

Gabriel Padilha Alves

**OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E
TOPOLÓGICA DE UMA TORRE DE LINHA DE
TRANSMISSÃO CONSIDERANDO DIVERSOS
HEURÍSTICOS**

Florianópolis, SC

2018

Gabriel Padilha Alves

OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E TOPOLÓGICA DE UMA TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO DIVERSOS HEURÍSTICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Engenharia Civil da Universi-
dade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de Engenheiro Civil.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Centro Tecnológico - CTC

Departamento de Engenharia Civil - ECV

Orientador: Leandro Fleck Fadel Miguel

Florianópolis, SC

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Alves, Gabriel Padilha

Otimização dimensional, geométrica e topológica de uma
torre de linha de transmissão considerando diversos
heurísticos / Gabriel Padilha Alves ; orientador, Leandro
Fleck Fadel Miguel, 2018.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Otimização estrutural. 3. Torres
de linha de transmissão. 4. Algoritmos heurísticos. I.
Miguel, Leandro Fleck Fadel. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

GABRIEL PADILHA ALVES

**OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL, GEOMÉTRICA E TOPOLÓGICA DE UMA
TORRE DE LINHA DE TRANSMISSÃO CONSIDERANDO DIVERSOS
HEURÍSTICOS**

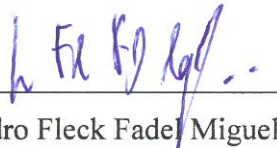
Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do diploma de Grau de bacharel em Engenharia Civil.

Florianópolis, 20 de novembro de 2018.

Prof.^a. Luciana Rohde, Dr.

Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Leandro Fleck Fadel Miguel, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Marcos Souza Lenzi, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Rafael Rodrigues de Souza, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Agradecimentos

Ao professor Leandro Fleck Fadel Miguel por ser um excelente profissional e pelas oportunidades de aprendizado que me possibilitou.

Ao Rafael Rodrigues de Souza por sempre estar à disposição e pelo seu entusiasmo em ensinar engenharia.

Aos meus pais, Giovani e Cristina, por todo apoio que me deram até agora e as lições de vida que me tornaram uma pessoa melhor.

Ao meu irmão, André, com quem sempre posso conversar e me divertir.

À toda a minha família, que sempre estenderam a mão para ajudar.

Aos meus amigos, Carolina, César e Gustavo, pela amizade que tornou a graduação um período muito melhor.

E à todos que contribuíram para que eu chegasse onde estou.

Muito obrigado!

Resumo

Este trabalho apresenta a otimização de dimensão, geometria e topologia simultâneas de uma torre de linha de transmissão de energia elétrica. Durante o processo de otimização, as restrições da ABNT NBR 8850 (2003) foram impostas. Um esquema de penalização da massa da torre faz com que o resultado seja classificado como inadequado caso as restrições da ABNT NBR 8850 (2003) não são cumpridas e também quando os ângulos das camadas do tronco inclinado não seguem as restrições apresentadas neste trabalho. Doze algoritmos heurísticos foram utilizados para otimizar a torre e o melhor resultado obtido é apresentado e comparado com os de Souza (2016) que apresentou um procedimento de otimização de dimensão, geometria e topologia, otimizando a mesma torre deste trabalho, porém com algumas considerações diferentes. Além disso, o BSA é utilizado para otimizar a torre desconsiderando a penalização de ângulos, a fim de determinar as vantagens e desvantagens de penalizar os ângulos das camadas do tronco inclinado.

Palavras-chave: Otimização estrutural; Torres de linha de transmissão; Algoritmos heurísticos.

Abstract

This work presents the optimization of the size, shape and topology of a transmission line tower. During the optimization process, the restrictions of ABNT NBR 8850 (2003) were imposed. A tower mass penalty scheme causes the result to be classified as inadequate if the ABNT NBR 8850 (2003) constraints are not met and also when the angles of the inclined body layers do not follow the constraints presented in this work. Twelve heuristic algorithms were used to optimize the tower and the best result obtained is presented and compared with those of Souza (2016), who presented an optimization procedure of size, shape and topology, optimizing the same tower of this work, but with some different considerations. Besides, the BSA is used to optimize the tower disregarding the angular penalty in order to determine the advantages and disadvantages of penalizing the angles of the inclined body layers.

Key-words: Structural optimization; Transmission line towers; Heuristic algorithms.

Lista de Figuras

Figura 1 – Tipos de torres	18
Figura 2 – Função convexa à esquerda e não-convexa à direita	20
Figura 3 – Projeto original da torre	26
Figura 4 – Casos de carregamento	27
Figura 5 – Comprimento de flambagem considerado para o treliçamento contínuo (direita) e para o defasado (esquerda)	29
Figura 6 – Camadas em um tronco inclinado	31
Figura 7 – Variações geométricas possíveis na otimização	33
Figura 8 – Possibilidades de barras secundárias para terminações em V	35
Figura 9 – Possibilidades de barras secundárias para camadas e terminações em X	35
Figura 10 – Ângulos considerados na penalização	37
Figura 11 – Triângulo retângulo da operação de soma	40
Figura 12 – Convergência dos melhores resultados	51
Figura 13 – Representação da torre gerada pelo melhor resultado	53
Figura 14 – Representação da torre gerada pelo melhor resultado do BSA (sem penalizar ângulos)	55
Figura 15 – Representação do melhor resultado de Souza (2016)	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Lista de perfis adotados	30
Tabela 2 – Possibilidades de variáveis geométricas	32
Tabela 3 – Número de possibilidades topológicas	34
Tabela 4 – Resultados da otimização	52
Tabela 5 – Resultados da otimização (continuação)	52
Tabela 6 – Resultados da otimização - Teste de parâmetros	52
Tabela 7 – Área dos grupos de barras	54
Tabela 8 – Resultados BSA (sem penalizar ângulos)	54
Tabela 9 – Área dos grupos de barras (sem penalizar ângulos)	56
Tabela 10 – Área dos grupos de barras de Souza (2016)	59

Sumário

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
1 Introdução	17
1.1 Generalidades	17
1.2 Objetivos	21
1.2.1 Objetivo geral	21
1.2.2 Objetivos específicos	21
1.3 Metodologia	21
2 Revisão de literatura	23
3 Concepção estrutural	25
3.1 Casos de carregamento	25
3.2 Análise estrutural	25
3.3 Restrições estruturais	28
4 Processo de otimização	29
4.1 Variáveis de projeto	29
4.1.1 Variação dimensional	30
4.1.2 Variação geométrica	30
4.1.3 Variação topológica	33
4.2 Penalização	34
4.2.1 Penalização estrutural	34
4.2.2 Penalização estética	36
4.2.2.1 Tronco inclinado defasado	37
4.2.2.2 Tronco inclinado contínuo	38
4.2.2.3 Ajuste para torres mais fechadas	39
4.2.2.4 Acelerando a otimização	42
4.3 Descrição dos algoritmos heurísticos	42
4.3.1 PSO	42
4.3.2 SGA	43
4.3.3 GWO	43
4.3.4 EVPS	44
4.3.5 CMAda	44
4.3.6 ECBO	45
4.3.7 CECBO	45
4.3.8 WOA-CBO	45
4.3.9 ACS	46
4.3.10 BSA	47
4.3.11 LBSA	47
4.3.12 DSA	48

5 Resultados	51
5.1 Algoritmos Heurísticos	51
5.2 Penalização	54
6 Discussões	57
7 Conclusão	61
8 Trabalhos Futuros	63
9 Referências	65

1 Introdução

1.1 Generalidades

A energia elétrica utilizada em residências, comércios e grandes indústrias, no Brasil, vêm a maior parte de fontes hídricas, sendo que estas se encontram distantes dos grandes centros consumidores, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica. Para que esse desafio seja superado, é necessário que extensas Linhas de Transmissão (LTs) sejam utilizadas para o transporte da energia gerada, podendo escolher entre dois tipos de LTs (ELIAS; FAKURY; GRILO, 2016):

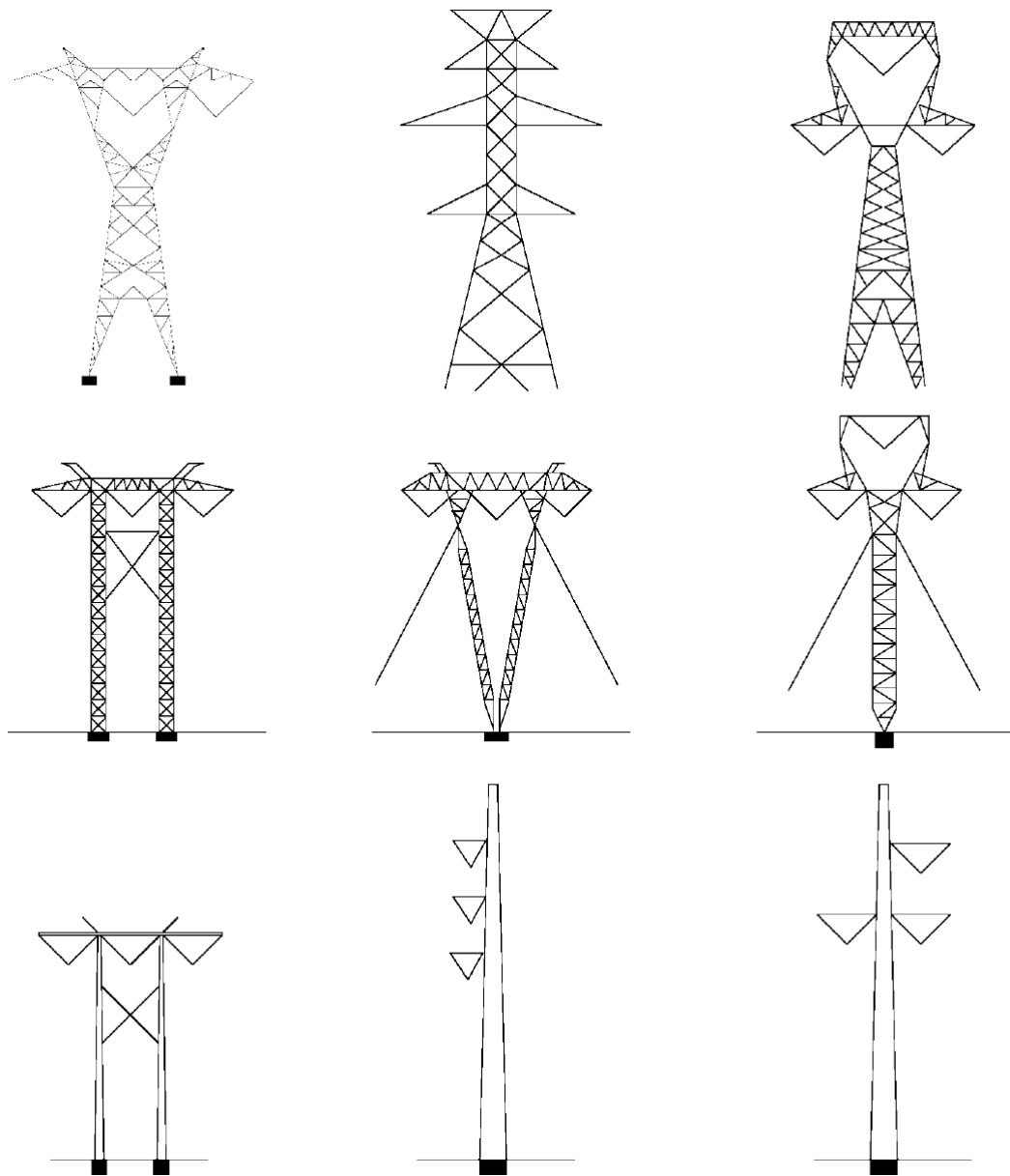
- aérea, cujos cabos são sustentados por torres; ou
- subterrânea, sendo esta última cerca de 20 vezes mais cara.

Presentes em linhas aéreas, as Torres de Linha de Transmissão (TLTs), podem ser autoportantes ou estaiadas e suas estruturas podem ter uma configuração horizontal, vertical ou delta. Torres treliçadas são geralmente de aço, construídas com perfis de cantoneiras. Também há torres tipo poste que podem ser de concreto, aço ou madeira (FANG; ROY; KRAMER, 1999). Alguns exemplos de torres podem ser vistos na Figura 1.

A função das torres é suspender os cabos condutores e de proteção (FANG; ROY; KRAMER, 1999), para garantir as distâncias elétricas mínimas necessárias, de forma a evitar contato elétrico com pessoas, vegetação e veículos que eventualmente atravessam a região. Pela razão de que a interrupção de uma rede elétrica pode afetar a qualidade de vida da população e potencialmente causar desastres secundários (FU, X.; LI, H.-N, 2018), as TLTs devem atingir um nível mínimo de segurança estrutural, determinadas por normas como a IEC 60826 (2003) (SOUZA, 2016). Cita-se algumas consequências sociais resultantes da interrupção do fornecimento de energia (RIPPEL, 2005):

- (a) desligamento de equipamentos hospitalares de funcionamento contínuo, passando a ser alimentados por geradores de emergência;
- (b) parada repentina de elevadores entre andares, induzindo alguns usuários ao pânico;
- (c) desativação de alarmes, propiciando a ocorrência de furtos;
- (d) desligamento de sistemas eletroeletrônicos de comunicação;
- (e) semáforos de ruas inoperantes causando tumulto no trânsito e possíveis acidentes entre veículos; e
- (f) desligamento de equipamentos elétricos industriais paralisando a produção.

Figura 1 – Tipos de torres



Fonte: Fang, Roy e Kramer, 1999

Uma grande parte dos colapsos das LTs estão relacionadas à ventos fortes (FU; LI; YANG, 2015). Na Austrália, os *downbursts* provocam mais de 90% das falhas nas linhas de transmissão do país (LI, 2000). Como as TLTs são caracterizadas por perfis leves e finos e de alta flexibilidade, essas estruturas acabam se tornando sensíveis ao carregamento do vento (FU et al., 2018). Com isso, tem-se definida a importância de estudar as forças que atuam em uma estrutura. No entanto, a descrição de carregamentos em estruturas, principalmente os de origem climática como o vento, assim como a descrição de propriedades, como a resistência mecânica, revelam características estatísticas (MENEZES, 1988).

Um projeto de engenharia é baseado na premissa de que a carga máxima que atuará

durante a vida útil da estrutura não superará sua resistência. Realisticamente, isto só pode ser descrito em termos de probabilidade. Entretanto, com o acúmulo de conhecimento, a etapa de projeto vem se tornando cada vez mais precisa em descrever a realidade. Com este aumento de precisão, é possível que as estruturas sejam cada vez mais otimizadas, requerendo menor utilização de recursos naturais e econômicos e trazendo maior segurança e conforto ao utilizá-las.

No caso das TLTs, a otimização é extremamente vantajosa. A redução de custo ao otimizar a estrutura de uma torre é multiplicada, uma vez que seu projeto provavelmente será utilizado em diversos lugares dentro de uma LT. Torres tangentes, que estão em uma linha reta, compreendem 80 a 90% das torres de uma LT (FANG; ROY; KRAMER, 1997). Além disso, os custos envolvendo transporte, construção, materiais e manutenção são proporcionais à massa da torre, o qual é o alvo no processo de otimização.

Em uma otimização estrutural de TLTs, de acordo com Souza (2016), espera-se uma redução de cerca de 10% da massa. Em 2016, o Brasil possuía 134.765 km de extensão de redes de transmissão e a previsão para 2019 é de 154.748 km, de acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), ou seja, 20 mil km de rede construídos em 3 anos. Considerando um peso de torres de 22 toneladas a cada quilômetro de LT e o quilograma de aço estrutural a 5,50 R\$ (ANEEL, 2005), em 3 anos seriam gastos 2,4 bilhões de reais. Reduzindo a massa destas torres em 10%, significaria uma economia de 240 milhões de reais em apenas 3 anos, além disso, haveria um menor consumo dos recursos naturais envolvidos na fabricação de aço.

Outro ponto positivo relacionado à otimização é que esta reduz a influência da experiência e habilidade do projetista (SOUZA, 2014). Ainda, com o uso de computadores para ajudar no processo de otimização (SIVAKUMAR et al., 2004), e com o aceleração deste através de máquinas mais potentes (WANG; OHMORI, 2013), a otimização está se tornando cada vez mais vantajosa e também menos custosa em termos computacionais, sendo capaz de convergir para melhores resultados em menos tempo. Essa caracterização de um resultado de otimização como melhor ou pior, pode ser feita por uma função objetivo.

Segundo Arora (2004), uma função objetivo mede o desempenho de diferentes projetos. Durante a otimização essa função objetivo deve ser minimizada ou maximizada. Por exemplo, maximizar o retorno de um investimento ou reduzir a massa de uma peça estrutural. Atualmente, diversas variáveis de projeto podem ser envolvidas em um processo de otimização e é possível realizar muitas iterações de uma função objetivo para encontrar soluções melhores, processo que seria inviável de ser realizado à mão.

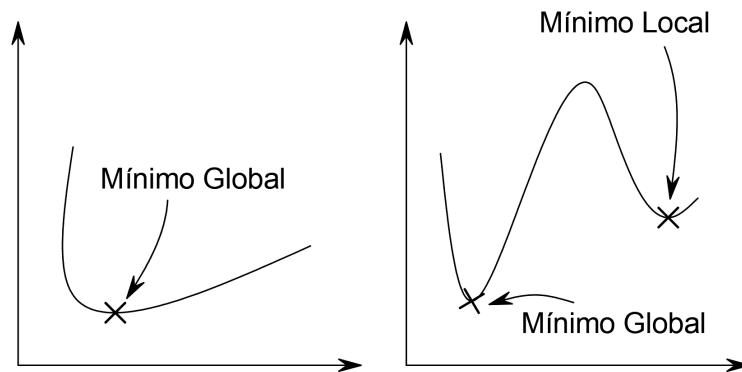
Uma função objetivo pode ser composta de variáveis contínuas, discretas ou então de uma mistura das duas. Contínuas são quando as variáveis podem variar continuamente na otimização, enquanto as discretas selecionam seus valores de um conjunto de peças (KAVEH; TALATAHARI, 2009). Um exemplo de variável discreta utilizada neste trabalho é a seleção das áreas das barras baseadas em um conjunto de perfis metálicos.

Além da função objetivo e das variáveis de projeto, a formulação de um problema de otimização também envolve restrições. Segundo Arora (2004), a maioria dos sistemas reais devem ser projetados e produzidos com certos recursos e atender requisitos de performance. Pode-se dizer que a lista de perfis que determinará as áreas das barras da torre é uma restrição de

recurso. A folga elétrica mínima que uma torre deve garantir também é uma restrição, portanto, algumas partes da torre não poderão ser modificadas, nem movidas, durante o processo de otimização. A resistência do aço à tração e compressão é outra restrição que deve ser atendida e que possui alta importância pelos diversos motivos, relacionados, estes, à segurança de uma LT, já citados anteriormente.

A função objetivo pode ser caracterizada como convexa ou não-convexa. Funções convexas possuem uma solução ótima única (ARORA, 2004) que podem ser obtidas por modelos matemáticos (SOUZA, 2016). As funções não-convexas são mais complexas e compõem a maior parte dos problemas de engenharia, pois estes são modelados com base em diversas variáveis e também muitas configurações ótimas são possíveis. A Figura 2 exemplifica estes dois tipos de funções.

Figura 2 – Função convexa à esquerda e não-convexa à direita



O mínimo local da função não-convexa representa o melhor resultado de uma região de busca.

Para resolver problemas não-convexos, uma possibilidade é o emprego de algoritmos heurísticos, que são métodos exploratórios que tentam se aproximar de soluções melhores a cada iteração. Os metaheurísticos, heurísticos de alto nível, se configurados corretamente não ficarão presos em um mínimo local (MIGUEL; LOPEZ; MIGUEL, 2013). Eles são desenvolvidos para resolverem uma gama de difíceis problemas de otimização sem que seja preciso adaptá-los profundamente ao problema (BOUSSAID; LEPAGNOT; SIARRY, 2013) e inclusive vêm sendo utilizados para a otimização de estruturas treliçadas, incluindo as de TLTs.

Segundo Rajan (1995), há a possibilidade de otimizar estruturas em três fatores:

- (1) Dimensão: são alteradas as dimensões das seções transversais da estrutura.
- (2) Geometria: posições dos nós são modificadas.
- (3) Topologia: acrescenta ou tira-se elementos da estrutura. Também podem ser utilizados modelos pré-definidos, onde o valor da variável define qual modelo será adotado.

Realizar uma otimização simultânea de dimensão, geometria e topologia cria mais possibilidades de se encontrar um melhor resultado. No entanto, como o processo envolve mais variáveis,

há um aumento no custo computacional e o problema passa a ser não-convexo quando se otimiza a geometria e/ou a topologia. Por este motivo, além dos outros citados, fica evidente que heurísticos são adequados para realizar uma otimização dimensional, geométrica e topológica.

Neste trabalho, será tratado de um problema de otimização não-convexo, com 86 variáveis de projeto discretas, e para lidar com este, serão testados doze algoritmos heurísticos. Por fim, será selecionado o melhor resultado gerado entre os doze algoritmos e comparado com uma dissertação de mestrado que otimizou a dimensão, geometria e topologia desta mesma torre, mas com considerações diferentes de topologia e considerando apenas um heurístico, o qual está entre um dos doze descritos aqui.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Otimizar a dimensão, geometria e topologia de um modelo de TLT vertical, treliçada, autoportante, de 230 kV.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar o comportamento dos algoritmos heurísticos em um problema complexo;
- Determinar o algoritmo heurístico mais adequado para a otimização deste problema;
- Garantir que ao fim da otimização a TLT possua estética adequada;
- Determinar as vantagens e desvantagens da penalização de ângulos das camadas do tronco inclinado; e
- Comparar com os resultados obtidos por Souza (2016).

1.3 Metodologia

As informações básicas da torre otimizada foram retiradas de um projeto e esta foi descrita matematicamente utilizando-se o *software* MATLAB, onde também feita sua análise e otimização estrutural. Os desenhos da torre foram realizados no AutoCAD.

Doze algoritmos heurísticos foram testados e baseado nos resultados, um destes foi escolhido para otimizar a torre sem penalizar os ângulos para determinar as vantagens e desvantagens da implementação desta penalização. O melhor resultado obtido dos doze heurísticos é comparado com o melhor resultado encontrado por Souza (2016), que otimizou a mesma torre mas com considerações diferentes quanto a análise estrutural e algumas variáveis dimensionais e topológicas.

Foram impostas restrições da ABNT NBR 8850 (2003) e caso não cumpridas, a massa da torre era penalizada. Durante cada avaliação da função objetivo no processo de otimização, a estética da torre era também penalizada, caso não seguisse as restrições impostas pelo autor.

Calculou-se o carregamento do vento seguindo-se as premissas da IEC 60826 (2003) e a análise estrutural foi realizada através do método da rigidez (SORIANO, 2005).

A otimização dimensional, geométrica e topológica foram realizadas simultaneamente e para determinar a topologia da torre foram utilizados modelos pré-determinados (*templates*).

2 Revisão de literatura

A otimização estrutural de treliças vem sendo bastante estudada nos últimos anos por Sved e Ginos (1968), Pedersen (1972), Saka (1980), Wu e Chow (1995), Fang, Roy e Kramer (1999), Matharaki et al. (2007), Kaveh, Gholipour e Rahami (2008), Kaveh e Talatahari (2009), Paris et al. (2012), Torii, Lopez e Biondini (2012) e Wang e Ohmori (2013).

Métodos de otimização onde as áreas de treliças são tomadas como variáveis são as mais encontradas na literatura, pelo motivo de que às vezes esse tipo de otimização pode ser considerada linear (TORII; LOPEZ; Biondini, 2012). Pode se encontrar um exemplo em Rajeev e Krishnamoorthy (1992).

A otimização geométrica de treliças, onde as coordenadas dos nós são alteradas, pode ser encontrada em Pedersen (1972), Wu e Chow (1995), Paris et al. (2012) e outros.

Entretanto, melhores resultados podem ser encontrados realizando otimização de dimensão, geometria e topologia (SOUZA, 2016). Os métodos de otimização topológica usualmente empregados em treliças se baseiam em uma estrutura de partida, que contém todas as conectividades possíveis entre os nós (*ground structure*) e durante a otimização, permite-se que sejam descartadas algumas barras (SOUZA, 2014).

Sivakumar (2004) estudou a otimização discreta de áreas de uma torre treliçada de linha de transmissão, submetida a restrições práticas, calculadas de acordo com a norma Indiana e perfis padrões encontrados na Índia. Utilizou-se algoritmos genéticos e abordagem orientada a objeto. Foi concluído que uma estrutura complexa, como uma TLT, pode ser simplificada considerando uma otimização em partes, reduzindo, assim, o número de variáveis, uma vez que algoritmos genéticos não têm sua convergência garantida e com um número de variáveis muito elevado a performance do heurístico acaba sendo reduzida.

A aplicação de otimização em torres treliçadas pode ser vista em Shea e Smith (2006), onde apresentam a otimização dimensional, geométrica e topológica de uma torre de grande escala, considerando valores discretos para as áreas da seção transversal. As restrições impostas durante o processo de otimização foram de esforços de tração e compressão, flambagem, esbeltez de barras comprimidas e de barras tracionadas, ângulo entre dois membros conectados, inclinação da perna da torre, o comprimento de cada membro e a área bruta de cada barra. Com a metodologia utilizada, a otimização de topologia, juntamente com dimensão e geometria, obteve um resultado pior comparada à otimização de apenas dimensão e geometria, com uma redução da massa de 16,7% nesta última. Foi empregado o heurístico chamado Simulated Annealing (SA), ou Recozimento Simulado.

Matharaki et al. (2007) apresentou um método de otimização baseado em confiabilidade para otimizar áreas, geometria e topologia da torre. Levou-se em conta valores discretos para as variáveis relacionadas às áreas, oriundas de membros do Manual de Construção em Aço do Instituto Americano de Construção em Aço de 2001 (AISC LRFD Manual - 2001) e o número de camadas pode ser alterado, além de poder modificar a altura de cada camada, mantendo sempre o topo da torre na mesma altura. Membros horizontais das camadas da torre podem ser

retirados aleatoriamente durante a otimização. Simetria nas quatro faces é imposta.

Paris et al. (2012) considerou variáveis contínuas para a otimização geométrica de torres de linha de transmissão e variáveis discretas para as áreas. Os requisitos impostos por códigos europeus e espanhóis foram seguidos e a formulação proposta considera aspectos práticos necessários durante o processo construtivo.

Souza et al. (2016) propôs um procedimento de otimização onde as variáveis de topologia escolhiam *templates* (modelos de topologia pré-determinados) ao invés de tirar ou colocar algumas barras e nós, conseguindo, assim, considerar treliçamento defasado, que consiste em um diferente arranjo entre as barras das faces longitudinais e transversais. Duas torres foram otimizadas, em que o resultado da otimização da primeira torre apresentou uma redução de 5,08% da massa da torre considerando a otimização de dimensão, topologia e geometria em comparação com apenas a otimização de dimensão. O resultado final da segunda torre apresentou uma redução de 6,41%, utilizando a mesma comparação. Para a primeira torre, utilizou-se dois algoritmos evolucionários na otimização e aquele que apresentou o melhor resultado foi utilizado para a otimizar a segunda torre. Restrições impostas seguiram as premissas do código da Sociedade Americana de Engenheiros Civis, ASCE 10/97.

Tort, Sahin e Hasançebi (2017) integrou o SA com o *software* comercial PLSTower para realizar a otimização voltada à aplicação industrial de dimensão, geometria e topologia de torres seguindo as restrições do código da ASCE 10/97. Uma redução de 10 a 26% da massa das torres foi obtida em comparação com a prática industrial.

Analisando os trabalhos apresentados, percebe-se que a otimização de topologia foi melhorando com o tempo, enquanto bons resultados com a otimização de dimensão e geometria foram mais facilmente obtidos, vistos em Shea e Smith (2006). Isso pode ser explicado pelo fato de que muitos trabalhos consideram diferentes restrições, quantidade de variáveis e abordagens alternativas à otimização topológica. Também o fato de considerar variáveis discretas para que a otimização gere resultados consistentes com a prática industrial pode influenciar a convergência, além do emprego de diferentes heurísticos, os quais vêm sendo amplamente pesquisados durante estes últimos 30 anos (BOUSSAID; LEPAGNOT; SIARRY, 2013). No entanto, o progresso demonstrado ao longo dos anos, que foi apresentado pelos trabalhos acima, evidencia que a otimização estrutural está melhorando consideravelmente, o que poderá, em um futuro próximo, ser implementada com maior frequência e até mesmo se alinhar com a etapa de projeto de muitas estruturas.

3 Concepção estrutural

Para a realização deste trabalho, foi proposta a otimização de uma TLT treliçada, vertical, de circuito simples, autoportante, de 230 kV, projetada com perfis de cantoneiras de abas iguais. A Figura 3 ilustra o projeto original da torre.

3.1 Casos de carregamento

A estrutura de uma torre pode estar submetida a uma variedade de combinações de cargas, determinadas por normas e padrões industriais. Cita-se algumas como o peso dos condutores e da própria torre, carregamento do gelo, do vento, cargas longitudinais por causa de desequilíbrio de forças nos condutores, cargas transversais, carregamentos durante a operação de construção e também durante a manutenção, torção e cargas dinâmicas resultantes do rompimento de condutores e cargas dinâmicas de condutores balançando (AL-BERMANI; KITIPORNCHAI, 1993).

Os quatro casos de carregamento estão demonstrados na Figura 4.

Para o caso (a) foi majorado o peso próprio em 1,3 vez, vento máximo a 75 graus e cabos intactos. No caso (b) o peso próprio foi multiplicado por 1,5, não há carregamento de vento. Este caso simula a fase de construção ou de manutenção. O caso (c) simula a ruptura de uma fase. É considerado vento reduzido na transversal e o peso próprio é majorado em 1,3 vez. Procedimentos usuais de análise e projeto recomendam aplicar carga devido a ruptura de cabo diretamente na torre (KAMINSKI-JR. et al., 2008). A ruptura de um para-raios é simulada no caso (d). Neste caso é considerado 1,3 vez o peso próprio da torre e vento reduzido na transversal.

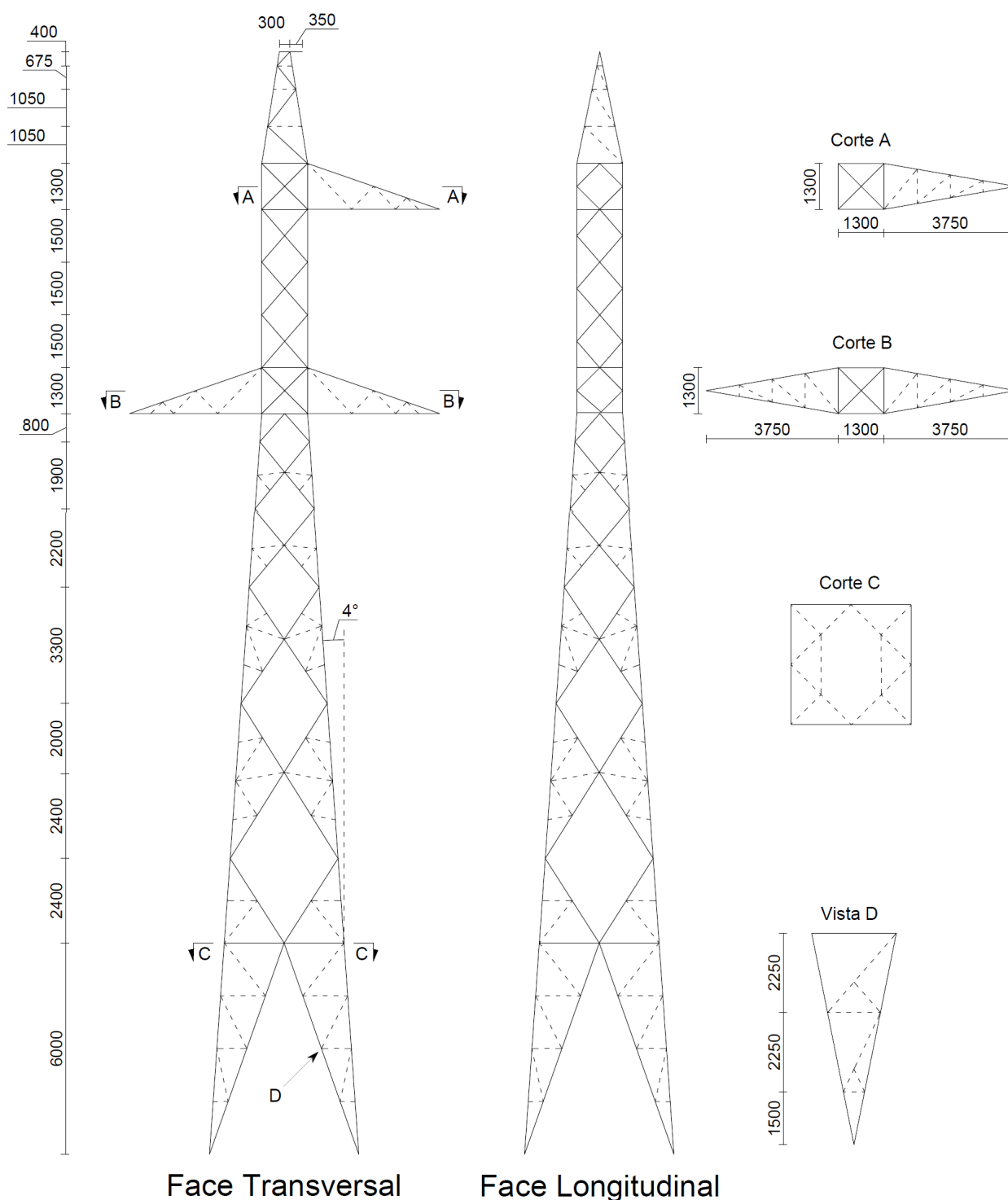
A força do vento considerada é calculada a cada avaliação da função objetivo, devido ao fato de que a área projetada dos membros é modificada durante o processo de otimização. Seguiu-se as recomendações da IEC 60826 (2003). Foi considerada uma pressão dinâmica de 409 N/m² e a rugosidade do terreno adotada foi de categoria B. Para os casos (c) e (d), a pressão dinâmica é reduzida, tendo seu valor multiplicado por 0,36.

3.2 Análise estrutural

A análise estrutural foi realizada através do Método dos Deslocamentos devido à facilidade de implementação em rotinas computacionais (SORIANO, 2005). Neste método, determina-se os deslocamentos e rotações sofridas pelos nós das barras da estrutura para depois auferir os esforços (MAU, 2015). O *software* utilizado para a realização da análise foi o MATLAB. Considerou-se um comportamento elástico-linear para o material, assumindo pequenas deformações e deslocamentos.

A análise elástica-linear vem servindo bem ao projeto de torres de transmissão por ser

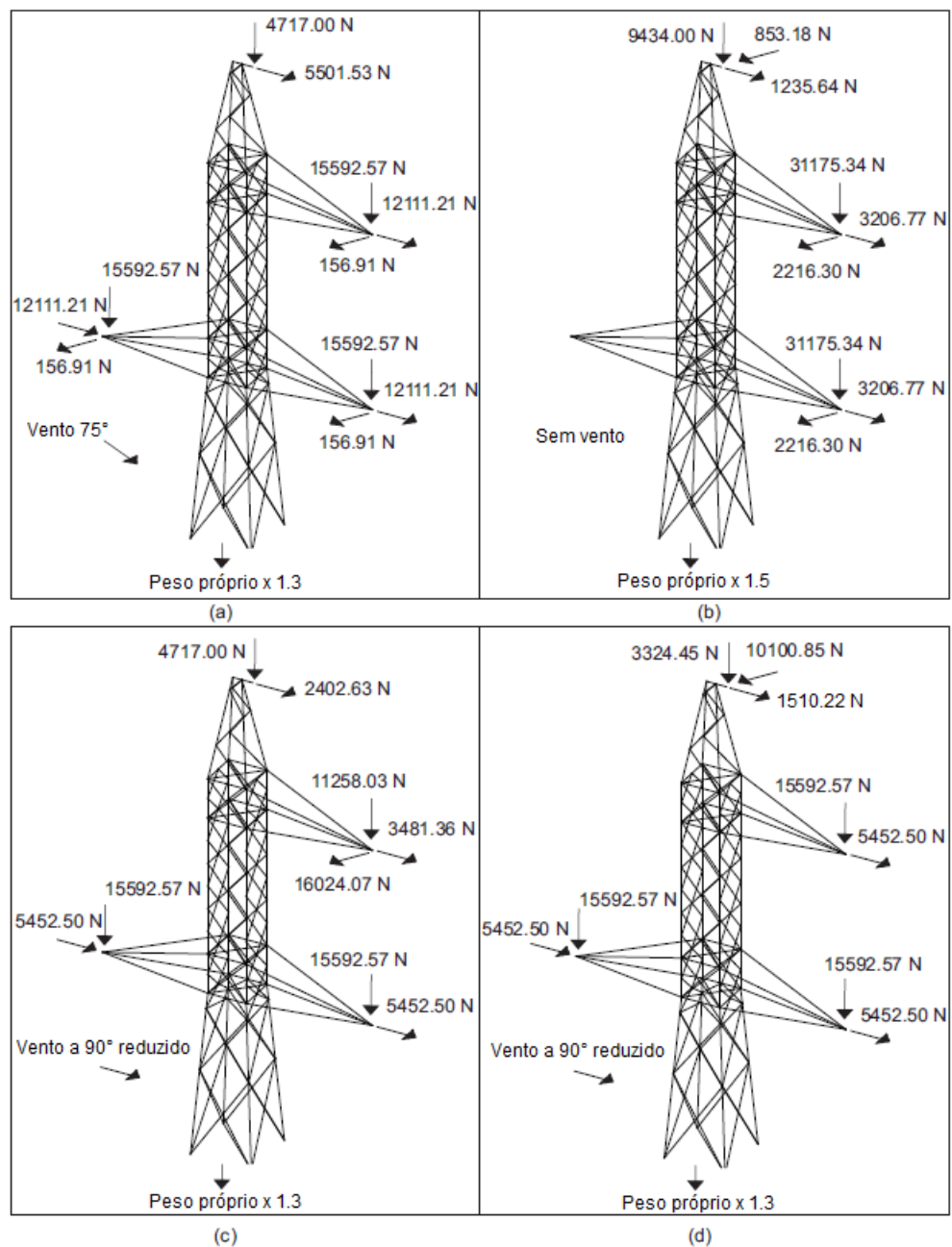
Figura 3 – Projeto original da torre



geralmente suficiente, uma vez que os efeitos secundários não são esperados de exceder mais que uma pequena parcela dos efeitos de carregamentos primários em torres autoportantes (KAVEH; GHOLIPOUR; RAHAMI, 2008).

Todas as barras da torre foram consideradas como elementos de pórtico espacial. Há também barras secundárias que servem para reduzir o comprimento de flambagem das barras principais, mas não assumem função estrutural. Suas áreas de projeção são consideradas no

Figura 4 – Casos de carregamento



FONTE: Adaptado de Souza (2016)

cálculo do esforço do vento, considerando-as com 40 mm de largura. Barras secundárias cuja projeção na face é a mesma de outras barras que estão mais a frente (mais próximas à face considerada no cálculo), não são consideradas no cálculo do carregamento do vento. Essas barras ocultas estão representadas como linhas tracejadas nos cortes A, B e C e vista D, na Figura 3.

3.3 Restrições estruturais

A estrutura está sujeita a restrições de tração e compressão, de esbeltez e à razão entre a largura da aba da cantoneira e espessura, estabelecidas de acordo com a ABNT NBR 8850 (2003).

A esbeltez efetiva estabelecida na norma é de 150 para montantes comprimidos, 200 para outras barras comprimidas e 250 para barras tracionadas. A razão máxima entre a largura da aba plana e a espessura da cantoneira é de 25.

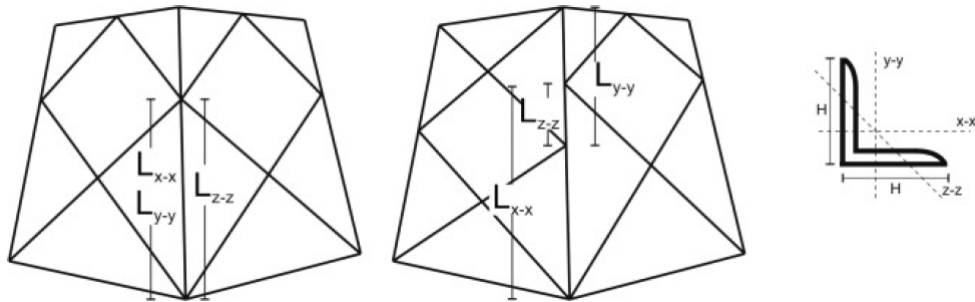
O deslocamento máximo de cada nó é de 0,4 m.

4 Processo de otimização

Neste trabalho, foram considerados modelos pré-estabelecidos (*templates*) para a otimização de topologia. Isso leva à vantagem do resultado final da otimização não gerar uma torre com formato esteticamente inadequado e inviável de se construir na prática. Outra vantagem é que se pode considerar treliçamento defasado para o tronco inclinado da torre. O benefício do defasado é a eliminação da necessidade de barras redundantes (secundárias), porém mais diagonais terão que ser consideradas (SOUZA et al., 2016).

O comprimento de flambagem para o treliçamento defasado passa a ser diferente do contínuo. Para este último, o comprimento considerado na flambagem é simplesmente distância entre nós adjacentes. Portanto, o efeito de flambagem ocorrerá no eixo de menor inércia (L_{zz}). Já para o defasado, deverão ser calculadas as relações L_{xx}/r_{xx} , L_{yy}/r_{yy} e L_{zz}/r_{zz} para saber em qual eixo ocorrerá a flambagem. Como foram consideradas apenas cantoneiras de abas iguais, o raio de giração do eixo x (r_{xx}) será o mesmo do eixo y (r_{yy}). A Figura 5 ilustra os comprimentos de flambagem para o treliçamento contínuo (esquerda) e o defasado (direita).

Figura 5 – Comprimento de flambagem considerado para o treliçamento contínuo (direita) e para o defasado (esquerda)



FONTE: Adaptado de Souza (2016)

4.1 Variáveis de projeto

Foram consideradas 86 variáveis de projeto para o processo de otimização, com um total aproximado de $9,5 \cdot 10^9$ possibilidades de resultados.

As variáveis de dimensão, geometria e topologia consideradas são, respectivamente, a_i , ξ_j , τ_k , onde:

- $i = 1, \dots, n_d$
- $j = 1, \dots, n_g$

- $k = 1, \dots, n_t$

Sendo $n_d = 55$, $n_g = 20$ e $n_t = 11$.

Cada uma dessas 86 variáveis pode assumir certos valores, os quais serão explicados nas seguintes seções.

4.1.1 Variação dimensional

As variáveis correspondentes à variação dimensional são definidas como discretas, uma vez que assumem valores inteiros de 1 a 10. A Tabela 1 mostra os perfis disponíveis para a escolha, sendo todos cantoneiras de abas iguais. As barras são divididas em grupos, totalizando um total de 55 grupos, ou, 55 variáveis dimensionais.

O total de possibilidades de variações dimensionais é de 10^{55} .

Tabela 1 – Lista de perfis adotados

Perfil (mm)	Área (cm ²)
L 40 x 40 x 3	2,35
L 45 x 45 x 3	2,66
L 50 x 50 x 3	2,96
L 50 x 50 x 4	3,89
L 60 x 60 x 4	4,71
L 60 x 60 x 5	5,82
L 65 x 65 x 4	5,13
L 75 x 75 x 5	7,36
L 75 x 75 x 6	8,75
L 90 x 90 x 6	10,6

- a_1 a $a_{55} = [1,10] \in \mathbb{N}$ - Perfis de grupos de barras (Tabela 1)

Os montantes foram separados em grupos, não podendo este possuir uma extensão maior que 6 metros. As barras pertencentes a um grupo recebem todas a mesma variável dimensional. Os dez perfis selecionados para a otimização são os mesmos utilizados por Souza (2016), no entanto neste trabalho considerou-se mais grupos de barras na otimização.

4.1.2 Variação geométrica

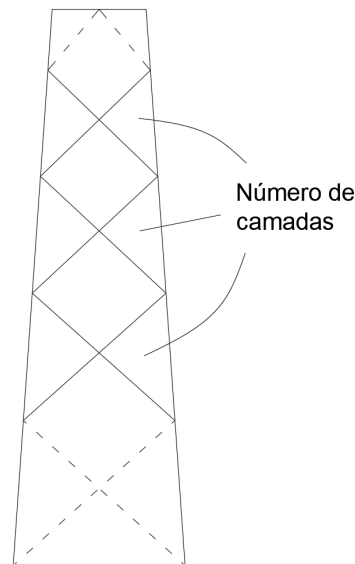
Durante a otimização, as coordenadas dos nós não são alteradas a partir da terceira casa decimal por facilitar no aspecto construtivo da torre, ou seja, o incremento das variáveis geométricas é de 0,01 m. Por exemplo, o valor 0,12345 m é arredondado para 0,12 m.

Os nós da base podem variar de -0,50 a 0,50 m, representados por círculos, em VAR. 1, na Figura 7. Quando um nó altera a posição, o outro também muda no mesmo valor, na mesma direção, porém no sentido oposto do outro. Variar 0,50 m significa aumentar o tamanho da base em 1 metro na longitudinal e 1 metro na transversal.

Os nós do tronco inclinado contínuo podem variar de -0,30 a 0,30 m na direção vertical. Todos os nós da mesma altura variam juntos para o contínuo e as faces são todas simétricas. Para o tronco defasado, os nós debaixo também variam esses valores, representados triângulos em VAR. 2 na Figura 7. Os nós de cima podem alterar suas posições em -0,20 a 0,20 m, representados por losangos e também por quadrados e pentágonos. Uma torre com uma camada a menos no tronco inclinado defasado apenas teria uma variação a menos de até 0,20 m para realizar em cada face, uma torre com duas camadas a menos teria duas variações a menos para realizar por face. Essas camadas que podem entrar ou sair durante a otimização estão representadas por barras diagonais pontilhadas e as variações não presentes em um tronco defasado com 7 camadas estão representadas por pentágonos. Uma torre de 6 camadas não possui as variações ilustradas por quadrados e pentágonos. Cada nó varia uma quantidade independente do outro e os da esquerda acompanham os da direita da mesma face. A face transversal varia independente da longitudinal.

A definição de camadas utilizadas aqui é explicada na Figura 6, onde as terminações inferior e superior não são levadas em conta, sejam elas formadas por barras em “X”, que se vê na terminação inferior representada na figura por barras tracejadas, ou em “V”, que está representada, na terminação superior da imagem, também por barras tracejadas. O tronco inclinado da Figura 6 possui três camadas.

Figura 6 – Camadas em um tronco inclinado



A variação representada por pequenos círculos em VAR. 3 possui um limite de 0,20 m, podendo variar nos dois sentidos da direção horizontal. Todos os nós nos quadrados do lado esquerdo variam juntamente e os nós do lado direito alteram suas coordenadas horizontalmente no sentido oposto ao do esquerdo. Uma variação de -0,20 m representa um encurtamento de 40 cm no tronco reto.

- ξ_1 a $\xi_8 = [-0.3, 0.3] \in \mathbb{Q}$ - Variação vertical dos nós do tronco inclinado;

- ξ_9 a $\xi_{18} = [-0.2, 0.2] \in \mathbb{Q}$ - Variação vertical dos nós situados mais em cima no tronco inclinado defasado;
- $\xi_{19} = [-0.5, 0.5] \in \mathbb{Q}$ - Variação horizontal dos nós da base; e
- $\xi_{20} = [-0.2, 0.2] \in \mathbb{Q}$ - Variação horizontal dos nós do tronco reto

A Tabela 2 mostra as possibilidades de variáveis geométricas, consideradas as mesmas de Souza (2016).

Tabela 2 – Possibilidades de variáveis geométricas

Variáveis Geométricas	Possíveis valores	Número de possibilidades
ξ_1 a ξ_8	de -0,30 a 0,30, incremento de 0,01	61^8
ξ_9 a ξ_{18}	de -0,20 a 0,20, incremento de 0,01	41^{10}
ξ_{19}	de -0,50 a 0,50, incremento de 0,01	101
ξ_{20}	de -0,20 a 0,20, incremento de 0,01	41

As variáveis que alteram a geometria da torre no sentido horizontal são aplicadas tanto para o defasado quanto para o contínuo. Nota-se que algumas variáveis simplesmente não possuem valor durante alguns pontos da otimização, pois ξ_9 a ξ_{18} é apenas para o defasado. Também para uma torre com uma topologia que possui menos camadas no tronco inclinado, algumas variáveis de geometria não são levadas em consideração pelo simples motivo de que há menos variações geométricas a serem feitas do que variáveis geométricas geradas pelo heurístico.

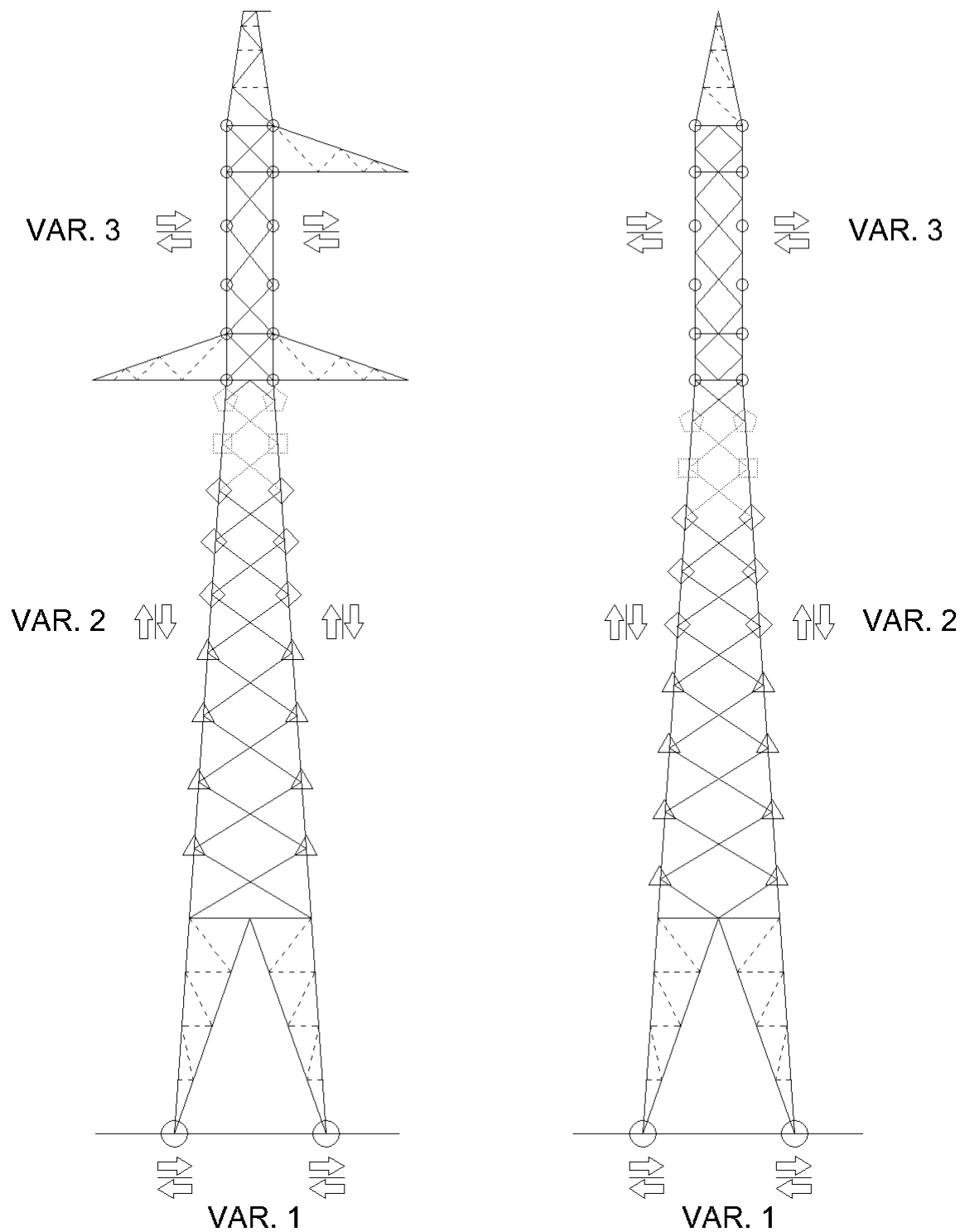
As cotas verticais dos nós do tronco inclinado são calculadas levando-se em consideração apenas o tamanho do tronco inclinado, o número de camadas e o tamanho das terminações inferior e superior. Assim para uma mesma camada, qualquer que seja a inclinação do tronco comum, as cotas verticais serão as mesmas. Após este cálculo das cotas é que a variação geométrica é aplicada.

Os valores das cotas verticais iniciais das terminações superiores e inferiores são:

- Inferior do tronco defasado: terminação em “X” de 2 m e “V” de 1 m;
- Superior do tronco defasado: terminação em “X” de 1,19 m e “V” de 0,5 m;
- Inferior do tronco contínuo: terminação em “X” de 2,4 m e em “V” a mesma medida; e
- Superior do tronco contínuo: terminação em “V” de 0,8 m.

Nota: as terminações também têm suas cotas variadas durante a otimização. Os valores acima são só os valores base que serão alterados pelas variáveis geométricas.

Figura 7 – Variações geométricas possíveis na otimização



4.1.3 Variação topológica

A variação topológica irá modificar apenas o tronco inclinado, alterando o padrão de treliçamento (contínuo ou defasado), o número de camadas e modelos pré-definidos das barras secundárias. Abaixo é explicado o valor de cada variável.

- $\tau_1 = [0,1] \in \mathbb{N}$ - Define se o tronco inclinado vai ser contínuo (0) ou defasado (1);
- $\tau_2 = [-1,1] \in \mathbb{Z}$ - Modifica o número de camadas. O valor -1 tira uma camada, enquanto o 0 mantém o padrão e o 1 adiciona uma camada. O padrão para o contínuo é 6 camadas e para o defasado é 7. Considerou-se uma camada a menos para o tronco contínuo pelo fato de que recebe barras secundárias;
- $\tau_3 = [0,1] \in \mathbb{N}$ - Coloca secundária na terminação superior em “V invertido” do contínuo (Figura 8). As letras T e L representam, respectivamente, a face transversal e a longitudinal;
- $\tau_4 = [0,8] \in \mathbb{N}$ - Define a terminação inferior, sendo de 0 a 1 para “V” sem ou com secundária (Figura 8), respectivamente, e 2 a 8 para as opções de terminação em “X” com ou sem secundárias (Figura 9); e
- τ_5 a $\tau_{11} = [2,8] \in \mathbb{N}$ - Determinam o padrão de secundárias em cada camada (Figura 9).

As variáveis τ_3 a τ_{11} servem apenas para o tronco inclinado contínuo, ou seja, durante o processo de otimização podem não influenciar no resultado caso τ_1 assumo o valor 1. A Tabela 3 apresenta as possibilidades de variações topológicas.

Tabela 3 – Número de possibilidades topológicas

Variáveis Topológicas	Possíveis valores	Número de possibilidades
τ_1	0, 1	2
τ_2	-1, 0, 1	3
τ_3	0, 1	2
τ_4	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	9
τ_5 a τ_{11}	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	7^7

4.2 Penalização

4.2.1 Penalização estrutural

No caso de a torre não obedecer as restrições descritas na Seção 3.3 em qualquer um dos quatro caso de carregamento já descritos em 3.1, ela recebe uma penalização em sua massa para que o heurístico entenda que as variáveis geradas para aquela torre não são adequadas e então busque convergir para um resultado mais adequado. A penalização é descrita de acordo com a equação abaixo, em que o fator P é somado à massa da torre:

$$P = \left[\sum_{b=1}^{nb} \left(\frac{\sigma_{Sb}}{\sigma_{Rb}} \right) + \sum_{b=1}^{nb} \left(\frac{\lambda_b}{\lambda_{t,c,mc}} \right) + \sum_{b=1}^{nb} \left(\frac{w/t_b}{w/t_{max}} \right) + \sum_{n=1}^{nn} \left(\frac{\delta_n}{\delta_{max}} \right) \right] \cdot 10^8 \quad (4.1)$$

Figura 8 – Possibilidades de barras secundárias para terminações em V

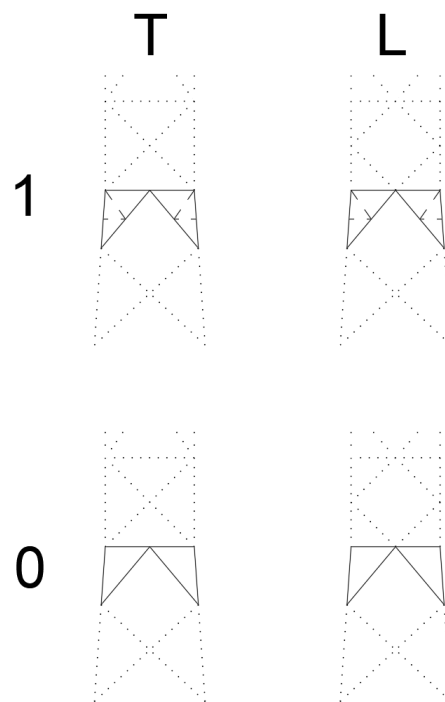
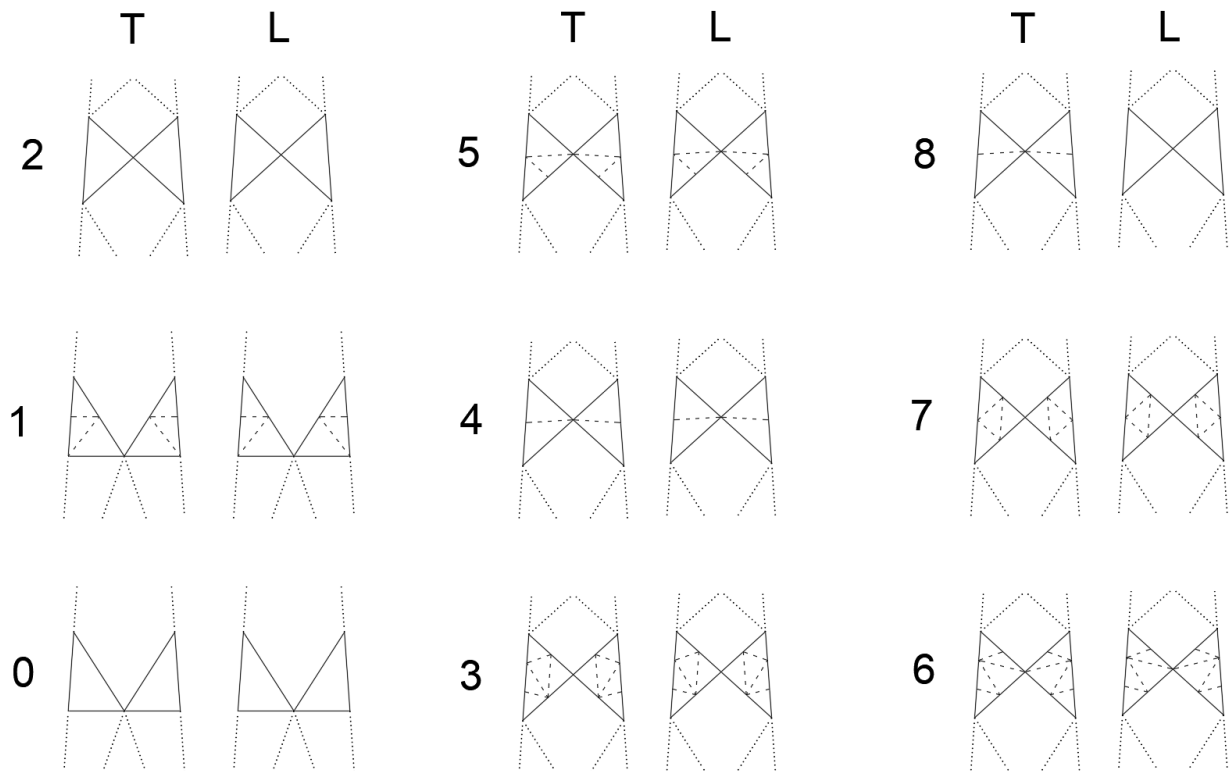


Figura 9 – Possibilidades de barras secundárias para camadas e terminações em X



Onde:

- nb - o número de barras da torre;

- σ_{sb} - tensão solicitante da barra;
- σ_{Rb} - tensão resistente da barra;
- λ_b - esbeltez da barra;
- $\lambda_{t,c,mc}$ - índice de esbeltez máximo dado pela ABNT NBR 8850 (2003), que depende se a barra é tracionada (t), comprimida (c) ou se é um montante comprimido (mc);
- w/t_b - relação entre largura da aba plana e espessura do perfil da barra;
- w/t_{max} - relação máxima entre largura da aba plana e espessura do perfil da barra;
- nn - número de nós da estrutura;
- δ - deslocamento do nó; e
- δ_{max} - deslocamento máximo do nó;

A estrutura só é penalizada caso alguma das relações descritas na Equação 4.1 seja maior que 1, senão o valor é arredondado para 0 (zero).

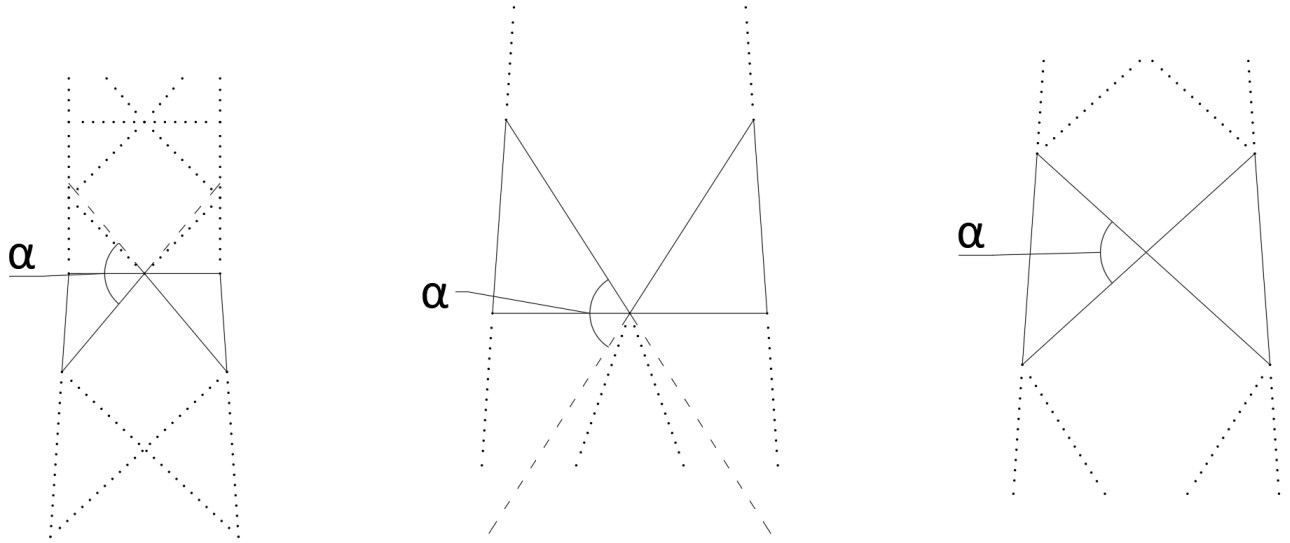
4.2.2 Penalização estética

A variação geométrica pode gerar uma torre com estética inadequada, em que as camadas do tronco inclinado podem ter uma aparência não uniforme, onde os ângulos das camadas crescem e de repente diminuem consideravelmente ou vice-versa. Pode ocorrer também de as terminações serem muito achatadas ou então possuírem ângulos absurdamente grandes. Para que a estética final apresente uma certa uniformidade nos ângulos e também que estes não sejam muito grandes, nem muito pequenos, os ângulos das camadas do tronco inclinado são penalizados. O ângulo considerado da camada está ilustrado no centro da Figura 10 por α . O ângulo para terminações em “V” está ilustrado na esquerda (terminação superior) e no meio (terminação inferior), onde as linhas tracejadas representam uma projeção da camada, simulando como seria sua continuação mantendo a mesma inclinação das barras diagonais, como se fossem uma camada em “X”, e as linhas pontilhadas representam a continuação real da torre. Essa penalização funciona semelhante à descrita anteriormente, onde um fator P é adicionado à massa da torre.

Para as terminações em “X” e as camadas do tronco (as quais também são em X), escolheu-se penalizar ângulos maiores que 115 graus e menores que 60 graus. Esses valores foram escolhidos após gerar várias torres com geometrias aleatórias e analisar quais ângulos pareciam exagerados e quais eram muito pequenos.

Para as terminações em “V” e “V invertido” ângulos maiores que 115 graus e menores que 70 graus são penalizados.

Figura 10 – Ângulos considerados na penalização



A penalização dos ângulos das camadas e terminações, de acordo com os limites citados acima, é explicada na Equação 4.2.

$$P = \sum \left(\left(\frac{\alpha}{\alpha_{min}} \right)^{-1} + \frac{\alpha}{\alpha_{max}} \right) \cdot pen \quad (4.2)$$

P soma os valores penalizados de cada camada. Em que os valores obtidos das frações só são computados se forem maiores que 1 e pen é 10 no defasado e 20 no contínuo, valores que serão explicados nas próximas seções. As variáveis α_{max} e α_{min} possuem os valores citados acima. Todas as camadas são penalizadas, incluindo as terminações, sendo elas em “X” ou em “V”.

Além dessas restrições, outras foram impostas para garantir uma uniformidade dos ângulos.

4.2.2.1 Tronco inclinado defasado

Para o tronco inclinado defasado, os ângulos entre as camadas em “X” só podiam crescer, observando-as debaixo para cima.

Considerou-se que o ângulo entre uma camada e a camada acima poderia aumentar no máximo:

$$(1 + n_{cam} \cdot 0, 1) \cdot (\alpha_{max} - \alpha_{min}) / n_{cam} \quad (4.3)$$

Onde:

- n_{cam} : é a quantidade de “X” no tronco inclinado, excluindo as terminações, sejam elas “V” ou “X”.
- α_{max} e α_{min} : valores máximos e mínimos que os ângulos em “X” podem ter, de 115 e 70 graus respectivamente.

Essa equação distribui o intervalo entre o máximo e o mínimo permitido para as camadas, mas devido as incertezas quanto à estética necessitou-se permitir uma variação maior, representada pela parte “ $1 + 0,1 \cdot n_{cam}$ ”, uma vez que a incerteza aumenta com o número de camadas.

Também considerou-se que o ângulo da camada seguinte (de cima) deveria aumentar no mínimo alguns graus. Tal limite é definido pela equação:

$$30/n_{cam}/(1 + n_{cam} \cdot 0,1) \quad (4.4)$$

Após várias verificações de torres esteticamente aceitáveis, constatou-se que uma variação em torno de 30 graus entre a primeira camada e a última produzia boas estéticas para a maioria das torres e mais que 30 graus dificilmente trazia um bom resultado. Variações muito pequenas ou negativas entre as camadas também não eram aceitáveis, pois é mais vantajoso para as torres com tronco comum defasado aumentarem consideravelmente os ângulos para que o comprimento de flambagem dos montantes mais de cima não ficassem muito pequenos e os debaixo muito grandes, sendo que estes já recebem maiores esforços.

Portanto, a parcela $30/n_{cam}$ procura reproduzir tais resultados, mas é dividida por $(1 + n_{cam} \cdot 0,1)$ para que não exclua alguns resultados possivelmente bons e para dar mais espaço para variação de geometria.

As terminações em “V” recebem limites diferentes. Elas podem tanto possuir ângulos maiores quanto menores que as camadas vizinhas. Limites menos restritos foram impostos para estas terminações, pois suas estéticas eram menos influenciadas pelos ângulos considerados em seus cálculos. Elas podem ter um ângulo maior que a camada vizinha de 2 vezes o valor obtido pela equação 4.3 e podem possuir um ângulo menor que a camada vizinha no valor da equação 4.4.

No defasado, quando algum limite não é respeitado esta parcela a mais é multiplicada por 10, ou seja, a massa da torre aumenta 10 kg por grau que ultrapassa os limites. Esse valor equivalente a 10 para o defasado é atribuído ao fator de penalização *pen*.

4.2.2.2 Tronco inclinado contínuo

Este tipo de treliçamento produziu resultados bons neste problema com ângulos de camadas próximos entre si, realizando diversas otimizações sem considerar a penalização. Portanto, restringir bastante o contínuo para obter bons resultados não é um problema como no defasado, uma vez que é mais fácil o tronco contínuo diminuir o comprimento de flambagem dos montantes sem precisar alterar tanto o ângulo pelo fato de poder escolher entre diversas opções de secundárias. É permitido que as camadas em “X” tanto aumentem quanto diminuam os ângulos, porém essa variação é mais restrita que no defasado por dois motivos: manter uma certa uniformidade, já que é permitida tanto uma variação positiva quanto negativa entre um ângulo de uma camada e a de sua vizinha de cima; e diminuir os ângulos debaixo para cima altera muito mais a estética do que aumentá-los. Este ultimo motivo se deve ao fato de que a torre fica mais estreita quanto mais para cima no tronco inclinado, então ângulos menores em

cima acabam aparentando ser muito pequenos em relação às camadas antecessoras. A Equação 4.5 define o quanto o contínuo pode variar seu ângulo é:

$$15/n_{cam}/(1 + n_{cam} \cdot 0, 1) \quad (4.5)$$

Ou seja, para o contínuo foi considerado que só poderia variar 15 graus entre a primeira camada e a última, metade do valor da Equação 4.4.

As terminações em “V” também foram penalizadas de forma diferente no contínuo, podendo variar positiva e negativamente o ângulo em 6 e 3 vezes, respectivamente, o valor da Equação 4.5, em relação à camada vizinha. É uma variação maior que a considerada no defasado, pois no contínuo é possível colocar barras secundárias nas terminações em “V”.

Tanto no defasado quanto no contínuo as terminações em “V” podem variar mais positiva do que negativamente. Isso se deve ao fato de que muitos resultados produzidos achatavam demais a terminação superior deste formato e resultados com estética mais adequada eram obtidos com ângulos bem maiores das terminações inferiores em “V” em relação a todas as outras camadas.

O fator de penalização *pen* do contínuo é de 20 kg por cada grau que ultrapassa os limites impostos, o dobro do defasado porque verifica-se apenas uma face do contínuo já que as outras são iguais tanto nos comprimentos quanto no treliçamento e padrão de secundárias.

4.2.2.3 Ajuste para torres mais fechadas

Tanto no tronco comum contínuo, quanto no defasado, os limites ainda sofriam uma modificação, pois uma torre mais fechada precisa variar mais o ângulo para atingir a mesma cota vertical de uma torre com tronco mais aberto. Para prevenir que a penalização preferisse torres mais abertas, recebe-se os dados das cotas verticais da face longitudinal já com a variação de geometria, e utilizando o ângulo θ do tronco inclinado de projeto, que representa a inclinação dos montantes com o eixo vertical Z, calcula-se as coordenadas horizontais da face, que são chamadas de x_o , onde “o” significa original. Depois, calcula-se as coordenadas horizontais com a inclinação do tronco consequente da variação geométrica, chamadas de x . Então, prossegue-se para a criação de duas variáveis, S_{xo} e S_x , que são obtidas através das Equações 4.6 e 4.7,

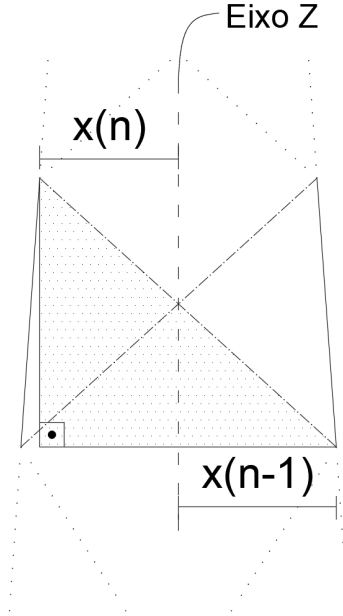
$$S_{xo} = x_{o(1:n-1)} + x_{o(2:n)} \quad (4.6)$$

$$S_x = x_{(1:n-1)} + x_{(2:n)} \quad (4.7)$$

Onde n é o tamanho do vetor de coordenadas horizontais calculadas. As variáveis S_x e S_{xo} resultam em um vetor com uma dimensão a menos em relação aos vetores x e x_o . Essas somas de vetores, servem para representar um cateto do triângulo retângulo que uma das barras diagonais das camadas em “X”, a qual é a hipotenusa, forma em relação ao eixo horizontal (eixo X ou Y, dependendo da face) e vertical (eixo Z). A Figura 11 mostra o triângulo retângulo. As barras diagonais da camada estão com traços e pontos intercalados, a área do triângulo retângulo está hachurada com pontos, o eixo Z tracejado (eixo da vertical) e a continuação da

torre se dá por linhas pontilhadas. A distância horizontal entre o eixo Z e o topo da camada e a distância horizontal entre o eixo Z e a base da camada são representadas, respectivamente, por $x(n-1)$ e $x(n)$.

Figura 11 – Triângulo retângulo da operação de soma



Realizando as somas vetoriais, a variável *forgiveness* é finalmente criada de acordo com o procedimento abaixo:

- Se a terminação inferior for em “V” e a superior em “X”, *forgiveness* é formada pela Equação 4.8.

$$forgiveness = \left[\frac{x_2}{x_{o2}}(;) \left(\frac{S_{x(2:n-1)}}{S_{xo(2:n-1)}}(.) + \frac{S_{x(3:n)}}{S_{xo(3:n)}}(.) \right) \div 2 \right] \quad (4.8)$$

- Se a terminação inferior for em “X” e a superior em “V (invertido)”, *forgiveness* é formada pela Equação 4.9.

$$forgiveness = \left[\left(\frac{S_{x(1:n-2)}}{S_{xo(1:n-2)}}(.) + \frac{S_{x(2:n-1)}}{S_{xo(2:n-1)}}(.) \right) \div 2(;) \frac{x_{n-1}}{x_{o(n-1)}} \right] \quad (4.9)$$

- Se a terminação inferior for em “V” e a superior em “V (invertido)”, *forgiveness* é formada pela Equação 4.10.

$$forgiveness = \left[\left(\frac{x_2}{x_{o2}}(;) \frac{S_{x(2:n-2)}}{S_{xo(2:n-2)}}(.) + \frac{S_{x(3:n-1)}}{S_{xo(3:n-1)}}(.) \right) \div 2(;) \frac{x_{n-1}}{x_{o(n-1)}} \right] \quad (4.10)$$

- Se a terminação inferior e superior forem em “X”, *forgiveness* é formada pela Equação 4.11.

$$forgiveness = \left[\left(\frac{S_{x(1:n-1)}}{S_{xo(1:n-1)}}(.) + \frac{S_{x(2:n)}}{S_{xo(2:n)}}(.) \right) \div 2 \right] \quad (4.11)$$

O operador (;) concatena verticalmente os vetores, n equivale à dimensão do vetor, e o operador (.) depois da fração indica que é uma divisão de elemento por elemento do vetor e \div divide todos os elementos do vetor resultante das operações entre parenteses. Nota-se que não são considerados os primeiros elementos do vetor S_x e S_{x0} quando a terminação começa em “V”, porque apenas a segunda coordenada forma um triângulo retângulo com o eixo Z. A mesma lógica é aplicada para terminação superior em “V invertido”, em que a penúltima coordenada é considerada ao invés da última.

É também feita uma média entre a divisão dos vetores de soma que correspondem às coordenadas que formam o cateto horizontal do triângulo retângulo das barras das camadas em “X” a fim de reduzir a dimensão do vetor *forgiveness* em uma unidade. Tal operação não afeta significativamente os valores de *forgiveness*, mas é necessária para que esta variável tenha a mesma dimensão de *dif*, a qual será explicada posteriormente.

Controlando os ângulos máximos e mínimos, prossegue-se para o controle da uniformidade dos ângulos já explicada. É realizada uma operação de subtração de vetores demonstrada na Equação 4.12, em que a diferença entre os ângulos é calculada.

$$dif = \alpha_{1:\alpha n-1} - \alpha_{2:\alpha n} \quad (4.12)$$

Onde αn equivale a dimensão do vetor α , o qual armazena o valor dos ângulos das camadas, inclusive das terminações. O primeiro ângulo da variável α é o da terminação inferior e segue, debaixo para cima, até o último que é o ângulo da terminação superior. Portanto, *dif* possui dimensão igual a $\alpha_n - 1$ e esta variável mede a diferença entre o valor de α_i e α_{i+1} , com i indo de 1 até $\alpha n - 1$.

Essa diferença entre os ângulos *dif* tem seus elementos multiplicados pelos elementos de *forgiveness* no contínuo, que então é comparada com os limites estabelecidos na Seção 4.2.2.2. Dessa maneira, para torres mais fechadas *dif* acaba tendo seu valor reduzido, assim, é mais difícil que este vetor possua valores maiores que os limites. No tronco inclinado defasado, como a camada de cima deve sempre ter ângulo maior que a debaixo, exceto quando comparadas às terminações em “V”, *dif* é multiplicada por *forgiveness*, ou dividida, dependendo se *dif* é comparada com o limite mínimo de variação de ângulos do defasado ou com o limite máximo.

Depois, o tanto que *dif* ultrapassa os limites impostos é somado à P , já calculado anteriormente na Seção 4.2.2. Por exemplo, se um elemento do vetor *dif* resultou em 5, mas a diferença de graus máxima entre camadas só podia ser 3 graus, então recebe 2 graus de penalização e este valor é multiplicado pelo fator *pen* e pelo elemento correspondente do vetor *forgiveness*.

Por fim, após as penalizações se somarem à variável P , o processo se encerra no tronco inclinado contínuo, enquanto no defasado a face transversal é analisada e também penalizada, agregando, ou não, mais valor à P . Terminada a verificação das duas faces, ou quando P é multiplicado por 2 no caso do contínuo, P é ajustado para que a penalização não prefira torres com menos camadas, uma vez que uma torre com mais camadas possui mais ângulos para penalizar. Então o valor de P é multiplicado de acordo com a Equação 4.13 para o defasado e

com a Equação 4.14 para o contínuo.

$$P = P \cdot n_{difmax}/n_{dif} \quad (4.13)$$

$$P = P \cdot n_{difmax}/n_{dif} \quad (4.14)$$

Onde n_{dif} é o tamanho do vetor dif e n_{difmax} é o tamanho máximo que o vetor dif pode atingir durante a otimização. O valor de dif é 9 para o defasado e 8 para o contínuo.

4.2.2.4 Acelerando a otimização

Encerrado o processo de penalização dos ângulos, o valor total de P é comparado com as variáveis geométricas e com pen . Caso P exceda o valor $4 \cdot pen \cdot n_{geo}$, onde n_{geo} é o número de variáveis geométricas, o qual varia de acordo com o número de camadas da torre, o processo de análise estrutural não é realizado e a estrutura recebe uma penalização de $P \cdot 10^{12}$. O valor escolhido para pular o processo significa que se cada variável geométrica fizer com que a torre ultrapasse mais de 4 graus dos limites estabelecidos, então, tais variáveis geram uma estética extremamente inadequada e o resultado final da torre já seria descartado, não valendo a pena gastar tempo com as operações que viriam a seguir, como o cálculo das matrizes de rigidez e dos deslocamentos, etapas que tomam a maior parte do tempo do processo de otimização.

4.3 Descrição dos algoritmos heurísticos

Foram testados doze algoritmos heurísticos no total. O melhor resultado oriundo dos testes destes algoritmos foi comparado com o resultado ótimo de Souza (2016). Uma breve descrição dos algoritmos será feita a seguir e os resultados serão tratados no capítulo seguinte. Considerou-se uma população de 30 indivíduos e 6000 iterações, totalizando 180.000 avaliações da função objetivo. Para o CMama, que possui população adaptativa, o número de avaliações também foi de 180.000.

4.3.1 PSO

O *Particle Swarm Optimization* (PSO), ou Otimização do Enxame de Partículas, utilizado foi uma função já existente no MATLAB. O PSO é um algoritmo estocástico para otimização, baseado em populações, fundamentado em princípios sócio-psicológicos. Todos os membros da população interagem entre si e sobrevivem até do começo ao fim do processo de otimização (KENNEDY; EBERHART, 1995).

O problema enfrentado por este algoritmo é que ele parava de convergir logo no começo do processo, ficando preso em um mínimo local. O melhor resultado encontrado, mesmo utilizando seis combinações diferentes de parâmetros, não foi satisfatório.

4.3.2 SGA

A ideia do *Search Group Algorithm* (SGA), ou Algoritmo do Grupo de Busca, é dividir as iterações em duas partes, uma fase global e outra local, onde na primeira o algoritmo tenta encontrar regiões promissoras à se explorar e na última ele explora estas regiões. O usuário pode escolher a porcentagem dedicada a cada fase, especificando o valor do parâmetro. A cada iteração, alguns indivíduos da população são substituídos por outros completamente novos e aqueles indivíduos não substituídos são mantidos para conceberem uma nova geração. Alguns outros parâmetros podem ser escolhidos também, como o número de indivíduos que serão perturbados daqueles que compõem a geração que sobreviveu; um valor inicial de perturbação da população; e um valor mínimo de perturbação, pois a cada iteração a população é cada vez menos “perturbada”. O SGA foi desenvolvido por Gonçalves, Lopez e Miguel (2015).

O melhor resultado encontrado testando-se dez diferentes parâmetros foi de 2.089,8496 kg, com os parâmetros:

- $\alpha_{min} = 0,25$
- $\alpha_{inicial} = 2,0$
- $N_{iterações} = 6000$
- $\text{Índice de iterações globais} = 0,60$
- $\text{Tamanho da população} = 30$
- $\text{Relação do grupo de pesquisa} = 0,40$
- $N_{perturbado} = 8$

4.3.3 GWO

Os lobos cinzas (*Canis lupus*) são considerados predadores que vivem no topo do cadeia alimentar. Eles preferem viver em alcateia, em um grupo de 5 a 12 integrantes em média. Os lobos cinzas possuem uma hierarquia onde os líderes, chamados alfas, são um macho e uma fêmea. Estes são responsáveis por tomarem as decisões do grupo. O segundo nível da hierarquia são os betas. O terceiro nível são os deltas, que representam os idosos, caçadores, exploradores e zeladores. O último nível é o ômega e lobos neste nível da hierarquia são os últimos a comerem, mas eles também têm uma certa importância mantendo a estrutura em ordem e quando morrem, os outros lobos acabam enfrentando problemas internos, podendo brigarem entre-si.

O Grey Wolf Optimizer (GWO), ou Otimizador Lobo Cinzento, modela essa hierarquia e a caça em grupo feita pelos lobos matematicamente (MIRJALILI; MIRJALILI; LEWIS, 2014). As fases do algoritmo são:

1. Hierarquia social
2. Rastreamento

3. Cercar a vítima
4. Ataque à presa

Como o SGA, o GWO permite menor variabilidade da população a cada iteração.

4.3.4 EVPS

Enhanced Vibrating Particles System (EVPS), ou Sistema de Vibração de Partículas Aprimorado é um algoritmo melhorado do Sistema de Vibração de Partículas (VPS), que apresenta convergência mais rápida, melhora no processo de busca para não ficar preso em mínimos locais e resultados otimizados (KAVEH; VAEZ; HOSSEINI, 2018). O EVPS é baseado na vibração livre do sistema de liberdade de único grau com amortecimento viscoso.

No VPS, primeiramente a população é gerada randomicamente e depois é avaliada a função objetiva, guardando o melhor resultado em uma variável chamada HB (Historically Best position). Depois são geradas GP (a Good Particle) e BP (a Bad Particle), onde GP é selecionada aleatoriamente entre os melhores resultados e BP entre os piores. Após isto, baseado em parâmetros do algoritmo, em HP, GP e BP, criam-se novas partículas que são geradas através de equações que procuram descrever o fenômeno de vibração de partículas. Avalia-se novamente a função objetivo, HB é atualizada e o processo se refaz a partir da parte onde GP e BP são gerados, até que chegue até a última iteração.

No EVPS, HB é substituído por uma memória com o tamanho da população. Uma das Melhores posições Históricas, OHB (One of the Best Historically positions), é uma linha selecionada aleatoriamente da memória. Se o HB for melhor que o pior valor da memória, este pior valor é substituído por HB. A equação que gera a nova população no EVPS é diferente do VPS, uma vez que HB não é mais utilizado como parâmetro para gerar a nova população.

O algoritmo levou cerca de 50 a 60% das iterações para atingir o resultado final. Após 60% não havia alterações no valor.

4.3.5 CMAMA

O CMAMA é uma variação do *Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy* (CMA-ES), que em português significa Estratégia de Evolução da Adaptação da Matriz de Covariância, criada por Brockhoff, Auger e Hansen (2012) e a parte “ma”, em CMAMA, significa Mutações espelhadas para o “m” e Ativo para o “a”. O CMA-ES foi bastante estudado na literatura (GONÇALVES, 2018). O CMAMA baseia-se em duas variações do IPOP-CMA-ES, onde IPOP (Increasing POPulation size) significa tamanho da população crescente, em que este algoritmo dobra o tamanho da população quando se atinge algum critério de convergência. A população inicial é dada por $4 + \text{floor}(3\log(D))$, onde D é a dimensão do problema e *floor* arredonda o número especificado para o inteiro mais próximo que seja menor que o número, ou igual se este já for um inteiro.

Uma das variações do IPOP-CMA-ES que inspiraram a criação do CMaMa foi o IPOP *active* CMA-ES, onde *active* significa ativo. Esta variação utiliza informações das piores soluções para reduzir o espaço de busca do algoritmo.

A outra variação é o IPOP-CMA-ES com mutações espelhadas. Nesta, apenas as piores soluções são espelhadas, formando novas soluções na direção oposta.

Considerou-se uma população adaptativa formada inicialmente pela fórmula citada acima, mas totalizando 180.000 avaliações da função objetivo, assim como nos outros heurísticos testados.

4.3.6 ECBO

No *Enhanced Colliding Bodies Optimization* (ECBO), cuja tradução é Otimização Aprimorada de Corpos Colidentes, um objeto colide com o outro e eles se movem em direção a um nível de energia mínimo, fenômeno também descrito por equações como no EVPS. Apesar de não atingir a melhor média, desvio padrão e melhor resultado entre os doze heurísticos, o ECBO mostrou uma convergência muito rápida, atingindo o resultado final entre cerca de 20 a 30% das iterações consideradas.

O ECBO inicia gerando uma população aleatória. Depois as iterações começam, avaliando a população inicial. Os resultados são salvos na memória e depois assumem o lugar dos piores resultados. Então os indivíduos da população (os corpos que colidem) são organizados em ordem decrescente e separados em dois grupos: estacionários e em movimento. As velocidades dos corpos são avaliadas e então atualizadas. Depois são formados novos corpos e então ocorre a avaliação da função objetiva novamente e o processo se repete, até que a última iteração seja atingida.

O heurístico ECBO é introduzido por Kaveh e Ghazaan (2014).

4.3.7 CECBO

Este é uma modificação do ECBO que tenta o deixar mais “caótico”, daí o “C” em CECBO. É compreensível a criação de tal algoritmo, uma vez que o ECBO parava de convergir logo no começo do processo de otimização. O CECBO apenas adiciona um mapa caótico após gerar a nova população, com a finalidade de perturbá-la. Logo depois, já ocorre a avaliação da função objetivo. O mapa logístico foi escolhido para tornar o ECBO mais caótico.

Kaveh, Dadras e Montazeran (2018) desenvolveram o CECBO para a otimização geométrica de treliças.

4.3.8 WOA-CBO

O WOA-CBO é um algoritmo híbrido que tem o objetivo de melhorar o *Whale Optimization Algorithm* (WOA), ou Algoritmo de Otimização de Baleias, inspirando-se no CBO e sua versão melhorada, o ECBO.

Primeiramente, as baleias são inicializadas randomicamente e segue-se para a avaliação da função objetivo, que é o passo inicial do processo iterativo. Depois atualiza-se a memória e

são determinadas baleias exploradoras (melhores resultados) e imitadoras (piores resultados). As exploradoras são atualizadas de uma maneira diferente das imitadoras e então reinicia-se o processo iterativo, até que se atinja a última iteração.

Kaveh e Moghaddam (2018) apresentaram o WOA-CBO, um heurístico híbrido, para resolver um problema de planejamento de canteiro de obras, e assim como o GWO e o SGA, a cada iteração os indivíduos da população são menos perturbados.

4.3.9 ACS

O algoritmo *Artificial Cooperative Search* (ACS), ou Pesquisa Cooperativa Artificial, foi inspirado no mutualismo e cooperação baseados na interação biológica de dois superorganismos eusociais que vivem no mesmo habitat. Em muitas espécies, a maioria dos membros se juntam para formar um superorganismo antes de migrarem para um habitat com maior quantidade de recursos. São usados exploradores (alguns membros do superorganismo) para explorar em detalhe o novo lugar antes de se mudarem para lá. Civicioglu (2013a) criou o ACS a fim de resolver problemas numéricos de otimização.

No ACS, α e β são os dois superorganismos presentes. Cada superorganismo contém sub-superorganismos que são iguais à dimensão da população. O número de indivíduos dentro dos sub-superorganismos é igual à dimensão do problema. α e β são utilizados para a detecção de sub-superorganismos de predadores e presas artificiais. Inicialmente, gera-se α e β randomicamente e então a função objetiva é analisada, tomando os dois sub-superorganismos como variáveis de entrada. Depois inicia-se o processo iterativo.

Os ciclos do ACS começam por determinar se o predador é α ou β , com 50% de chance de ser um dos dois. Depois a presa tem também 50% de chance de assumir o valor de α ou β . Os sub-superorganismos da população das presas são alterados de posição randomicamente. Então, prossegue-se para a criação de indivíduos ativos, os quais são envolvidos na migração a qualquer momento e são gerados randomicamente e possuem 90% de chance de serem criados. Caso um sub-superorganismo seja completamente formado por indivíduos ativos, algum indivíduo ativo, escolhido aleatoriamente, é retirado. Após este processo, segue-se para a criação da população, que depende de um fator de escala interno, das presas e dos predadores. Os indivíduos ativos, então, são utilizados para modificar a população gerada. Caso haja um indivíduo ativo no sub-superorganismo, ele assume o valor do predador. Logo após, é aplicado um mecanismo para controlar os limites, que impede que as variáveis geradas não ultrapassem os limites estabelecidos pelo usuário durante o processo de otimização. Caso haja alguma variável fora dos limites, ela é substituída por um valor aleatório que se encontra dentro dos limites.

Gerando a população, avalia-se a função objetivo. Resultados melhores que o resultado obtido pela avaliação do predador, fazem com que o predador assuma o valor deste resultado e seus indivíduos. Dependendo se o predador recebeu α ou β no início, agora essas variáveis recebem os indivíduos e o valor avaliado do predador. O processo iterativo é iniciado novamente, até que atinja o último ciclo definido pelo usuário.

4.3.10 BSA

O *Backtracking Search Algorithm* (BSA), ou Algoritmo de Pesquisa de Retrocesso desenvolvido também por Civicioglu (2013b), é um algoritmo evolucionário designado para convergir para um mínimo global. Ele é dividido em cinco passos, descritos a seguir:

1. Inicialização: o BSA inicializa a população P randomicamente e avalia a função objetivo antes de iniciar o processo iterativo. Também inicializa uma população histórica chamada P_{hist} .
2. Seleção-I: o algoritmo inicia os ciclos e logo no começo há chance de 50% de P_{hist} se tornar igual a P e então, os indivíduos de P_{hist} são colocados em uma ordem aleatória.
3. Mutação: uma população mutante é gerada em função de P , P_{hist} e um fator F que controla a amplitude da matriz de busca ($P_{hist} - P$), que será descrita em breve. A mutação ocorre com a etapa de cruzamento. O fator F assume um valor aleatório de 0 a 3.
4. Cruzamento: é montada uma matriz binária do tamanho ($N \times D$), chamada map , onde N é o número da população e D o número de variáveis do problema (genes). Tal matriz servirá para atualizar a população mutante. Há 50% de chance da matriz binária assumir o valor 1 em um número aleatório de genes dos indivíduos da população ou então de apenas um gene aleatório de cada indivíduo receberá o valor 1 na matriz map . Após esse processo, ocorre uma recombinação que é a junção das etapas cruzamento e mutação. Durante a recombinação, apenas os genes que possuem valor 1 na matriz map são modificados, como mostra a Equação 4.15.

$$Mutante = P + F \cdot (P_{hist} - P)(.) * map \quad (4.15)$$

Onde $(.)^*$ multiplica termo por termo das matrizes.

5. Seleção-II: a função objetivo é avaliada considerando a população já recombinada (que sofreu mutação) e então é comparada com a população P a qual tem seus piores indivíduos substituídos pelos da população mutante que são melhores.

Por fim, reinicia-se o processo iterativo do ponto onde P_{hist} tem 50% de chance de assumir o valor da população P , agora atualizada, ou manter seu valor antigo.

Há também um controle das fronteiras da população, para não deixar nenhum gene ultrapassar os limites das variáveis propostas no problema. Quando algum gene ultrapassa o limite superior, há uma chance de 50% de ele assumir um valor aleatório dentro dos limites ou então de assumir o valor limite superior. O mesmo ocorre quando ultrapassa a fronteira inferior, mas o valor limite que possui uma chance de assumir neste caso é o inferior.

4.3.11 LBSA

O heurístico Learning Backtracking Search Algorithm (LBSA), sendo *Aprendendo* a tradução de *Learning*, foi criado por Debao et al. (2017) com o intuito de melhorar a performance

do BSA, tornando a convergência deste mais rápida. O LBSA adapta o BSA considerando que os indivíduos da população aprendem com o melhor indivíduo desta e se afastam do pior. Durante a etapa de mutação, diferentes equações são adotadas, considerando o melhor e o pior indivíduo nesta etapa.

A mutação pode ocorrer através da Equação 4.16, com 50% de chance de tal ocorrência.

$$Mutante = P + F \cdot 0,5 \cdot (P_{hist} - P) + 0,5 \cdot rand(.) * (Professor - P) \quad (4.16)$$

Onde $rand$ é um número aleatório de 0 a 1 e $Professor$ é o melhor indivíduo da população.

Ou então, há 50% de chance de um indivíduo aleatório P_k da população ser escolhido e a mutação ocorrer em função dele, onde cada indivíduo da população (P_i , em que i vai de 1 até o número da população) é comparado a ele. Se P_k for pior que P_i , a Equação 4.17 determina a mutação, senão esta é determinada pela Equação 4.18.

$$Mutante = P_i + rand \cdot (P_i - P_k) + rand \cdot (Professor - P_i) - rand \cdot (Pior - P_i) \quad (4.17)$$

$$Mutante = P_i + rand \cdot (P_k - P_i) + rand \cdot (Professor - P_i) - rand \cdot (Pior - P_i) \quad (4.18)$$

$Pior$ representa o pior indivíduo da população, lembrando que o pior é definido pela torre com maior massa, seja ela penalizada ou não.

A etapa de cruzamento também é modificada. A matriz map do BSA é obtida de forma invertida no LBSA, onde há 50% de chance de genes aleatórios receberem o valor 0 ao invés de 1 e 50% de chance de apenas um gene aleatório de cada indivíduo receber o valor 0. O resto da matriz é toda composta pelo valor 1. Depois map é utilizada para modificar os genes da população mutante se aquele gene for igual a 1 como no BSA. Entretanto, o gene modificado apenas assume o valor do gene da população P , como na Equação 4.19.

$$Mutante_{i,j} = P_{i,j}, \text{ se } map_{i,j} = 1 \quad (4.19)$$

Aqui i representa o lugar do indivíduo na população e j a coluna da matriz que seleciona o gene.

4.3.12 DSA

Semelhante ao ACS, o *Differential Search Algorithm (DSA)*, ou Algoritmo de Busca Diferencial, descreve o movimento utilizado por um superorganismo para migrar. Foi criado por Civicioglu (2012) para transformar coordenadas cartesianas geocêntricas em coordenadas geodésicas. No DSA, o superorganismo artificial (população) migra para um mínimo global também. Os membros da população que descobrem um local melhor para ficarem, acabam se estabelecendo ali. Organismos artificiais são compostos por membros e compõem os superorganismos.

Uma posição inicial é gerada randomicamente dentro dos limites estabelecidos no problema e em seguida é avaliada. Após esta inicialização, o processo iterativo inicia e parâmetros de controle são gerados, chamados de p_1 e p_2 , cujos valores variam aleatoriamente entre 0 e 0,3.

Prossegue-se, então, para a geração da direção de busca do superorganismo, onde um parâmetro chamado *método* é definido pelo usuário. Pode-se escolher entre quatro métodos ou então combiná-los de modo a formar um método híbrido, o qual consiste em uma escolha aleatória feita pelo heurístico em cada iteração de qual método será utilizado. Para tornar o DSA híbrido, basta definir a variável *método* como um vetor linha com os métodos que se deseja combinar, por exemplo:

$$metodo = [1 \quad 3 \quad 2 \quad 1]$$

Quando se repete o mesmo método, ele tem uma maior chance de ocorrência. Uma descrição de cada método é feita abaixo:

- Método 1 (DSA Bijetor): evolui o superorganismo em direção a um superorganismo permutado (i.e., direções aleatórias), ou seja, apenas muda a posição do superorganismo aleatoriamente.
- Método 2 (DSA Subjetivo): evolui o superorganismo em direção a “algumas das melhores soluções aleatórias”, onde é criado um índice que indica a posição dos superorganismos por ordem de melhor para pior e deste índice são selecionadas randomicamente as melhores posições.
- Método 3 (DSA Elitista 1): evolui o superorganismo em direção a “uma das melhores soluções aleatórias”. Neste método, o DSA organiza as posições dos organismos de melhor para pior, escolhe aleatoriamente uma dessas posições e todos os organismos vão à ela, ou seja, a população fica toda igual.
- Método 4 (DSA Elitista 2): evolui o superorganismo em direção à melhor posição, tornando seus organismos todos iguais como no método 3, mas baseado no organismo com a melhor posição.

Após gerar o superorganismo direcionado, uma matriz binária *map*, semelhante à do BSA é criada. A matriz *map* começa com valores iguais a zero, do tamanho do superorganismo. Dois caminhos podem ser seguidos para a criação de *map*, com 50% de chance de ir para um ou outro. Dentro do primeiro caminho, há duas possibilidades e do segundo apenas uma.

- Caminho 1 (50% de chance): se um número gerado de maneira aleatória com valor entre 0 a 1 for menor que p_1 , os valores de 0 a 1 em *map* são colocados aleatoriamente, com chance igual para que seja 0 ou 1. Se o número aleatório gerado for maior que p_1 , apenas um membro aleatório de cada organismo assume valor igual a 1.
- Caminho 2 (50% de chance): uma quantidade igual a $\text{ceil}(p_2 \cdot n_{var})$ de números inteiros pseudo-aleatórios distribuídos uniformemente, variando de 1 até n_{var} , é gerada e utilizada para determinar quais membros de cada organismo de *map* serão iguais a 1.

Nota: n_{var} é o número de variáveis do problema e a função *ceil* arredonda para cima, por exemplo, $\text{ceil}(25, 133) = 26$.

Gerando a matriz binária *map*, segue-se para a criação de um novo superorganismo, descrito pela Equação 4.20 e que se chama “*stopover*”, palavra do inglês que pode ser traduzida como local de parada, que no DSA representaria uma área com potencial para se migrar.

$$stopover = superorganismo + F \cdot map(.) * (direção - superorganismo) \quad (4.20)$$

O fator de escala F tem seu valor produzido por um gerador de números gama-aleatórios, com formato definido como 1 e escala 0,5, que depois é invertido. Descreve-se a geração do fator de escala que ocorre em cada ciclo (iteração) na Equação 4.21.

$$F = 1/gamrnd(formato, escala) \quad (4.21)$$

Onde formato e escala são dados de entradas para a função *gamrnd* embutida no MATLAB.

Depois é aplicado o controle das fronteiras da população, que é igual ao do BSA, para garantir que todos os membros estejam dentro dos limites do problema. E por fim, segue-se para uma etapa igual à Seleção-II do BSA, onde é avaliada a função objetivo, utilizando a população *stopover*. Os organismos do superorganismo que possuem avaliação pior que os do *stopover* são substituídos pelos organismos do *stopover*.

Inicia-se o próximo ciclo com, novamente, a criação dos parâmetros p_1 e p_2 e segue-se para os próximos passos já descritos.

O melhor resultado encontrado foi com este algoritmo, utilizando o método 2 e ele também apresenta pequeno desvio padrão para os métodos 1 e 3. No capítulo a seguir, descreve-se os resultados encontrados nos doze algoritmos.

5 Resultados

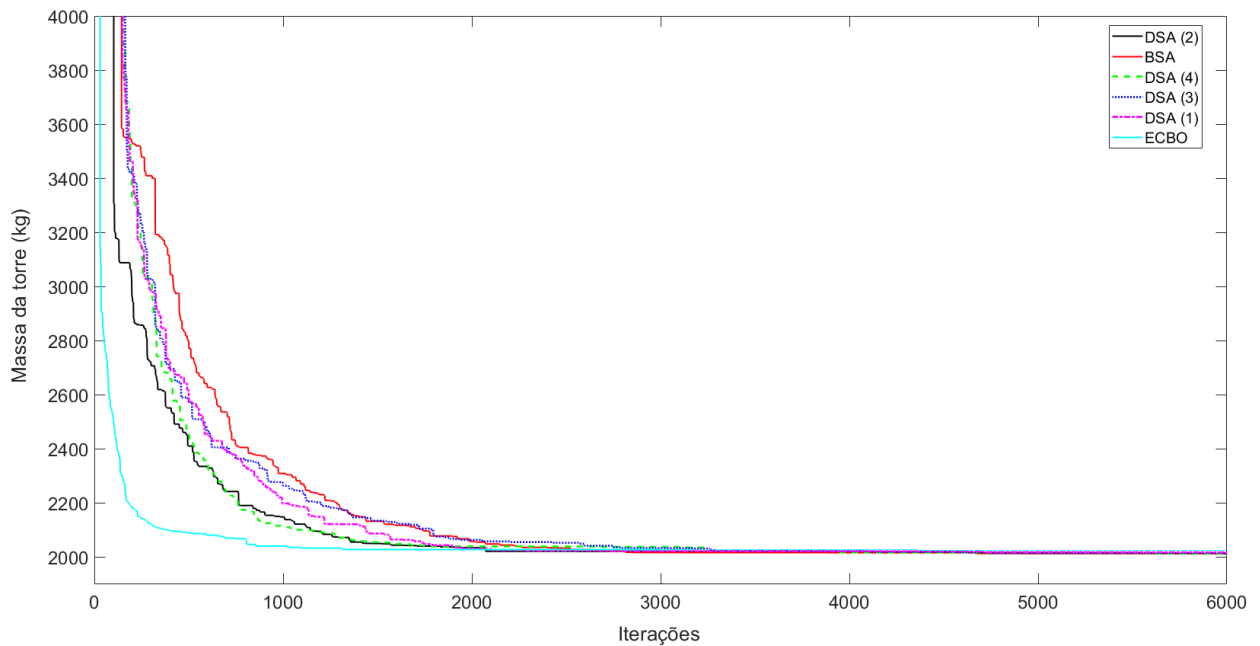
5.1 Algoritmos Heurísticos

Foram realizadas 65 rodadas independentes no total, sendo que cada uma levava cerca de 8 horas em um *notebook* com 8 GB RAM e Intel Core i7-4710MQ de 2.5 GHz, somando cerca de 520 horas.

Nas Tabelas 4, 5 e 6 expõe-se os resultados da otimização de cada algoritmo, os quais foram organizados do melhor para o pior, observando as tabelas da esquerda para a direita. NRI significa Número de Rodadas Independentes e DP e MR são respectivamente as abreviações de Desvio Padrão e Melhor Resultado. Na Tabela 6 não foi calculada a média e o desvio padrão porque cada rodada foi efetuada com um parâmetro diferente. Portanto, a média e o desvio padrão não teriam muito significado.

Apresenta-se as convergências dos melhores resultados dos heurísticos da Tabela 4 e na Figura 12.

Figura 12 – Convergência dos melhores resultados



O melhor resultado foi gerado pelo DSA utilizando-se o método 2, o menor desvio padrão foi obtido pelo DSA método 1 e o BSA obteve a melhor média. Estes valores estão destacados em negrito na Tabela 4.

O resultado do DSA método 2, de 2012,6 kg está representado na Figura 13 e as áreas dos grupos de barras estão na Tabela 7, onde:

- HT - barras horizontais da face transversal;
- HL - barras horizontais da face longitudinal;

Tabela 4 – Resultados da otimização

	DSA (2)	BSA	DSA (4)	DSA (3)	DSA (1)	ECBO
NRI	5	5	5	5	5	3
Média	2030,8622	2020,7210	2040,9358	2023,5833	2023,3702	2106,8476
DP	27,4396	7,3686	30,6356	8,2019	5,0844	68,7631
MR	2012,5809	2012,9870	2013,1405	2015,1180	2018,1428	2028,1292

Tabela 5 – Resultados da otimização (continuação)

	CMama	LBSA	ACS	EVPS	GWO	CECBO	WOA-CBO
NRI	5	3	5	3	5	3	3
Média	2153,4200	2067,5740	2078,2338	2136,0084	2186,2740	2260,1829	2708,5609
DP	82,2000	16,7201	20,6381	55,0139	68,1274	78,9737	41,0419
MR	2039,6083	2052,3480	2053,6917	2073,1655	2125,567	2209,5476	2663,2282

Tabela 6 – Resultados da otimização - Teste de parâmetros

	SGA	PSO
NRI*	5	5
MR	2089,8496	2368,7067

*Cada rodada foi efetuada com um parâmetro diferente

- PT - barras diagonais da face transversal na base da torre;
- PL - barras diagonais da face longitudinal na base da torre;
- M - grupo de montantes;
- TM - barras das mísulas;
- PM - barras horizontais das mísulas;
- X - barras horizontais, formando um “X”, representadas no corte A e B (Figura 13);
- DT - diagonais da face transversal;
- DL - diagonais da face longitudinal;

- BP - grupo de barras do topo; e
- LL - barras horizontais no topo da torre que sustentam os cabos para-raios, com perfil 2L 75 x 75 x 6, cuja área da seção transversal é de 17,5 cm².

Figura 13 – Representação da torre gerada pelo melhor resultado

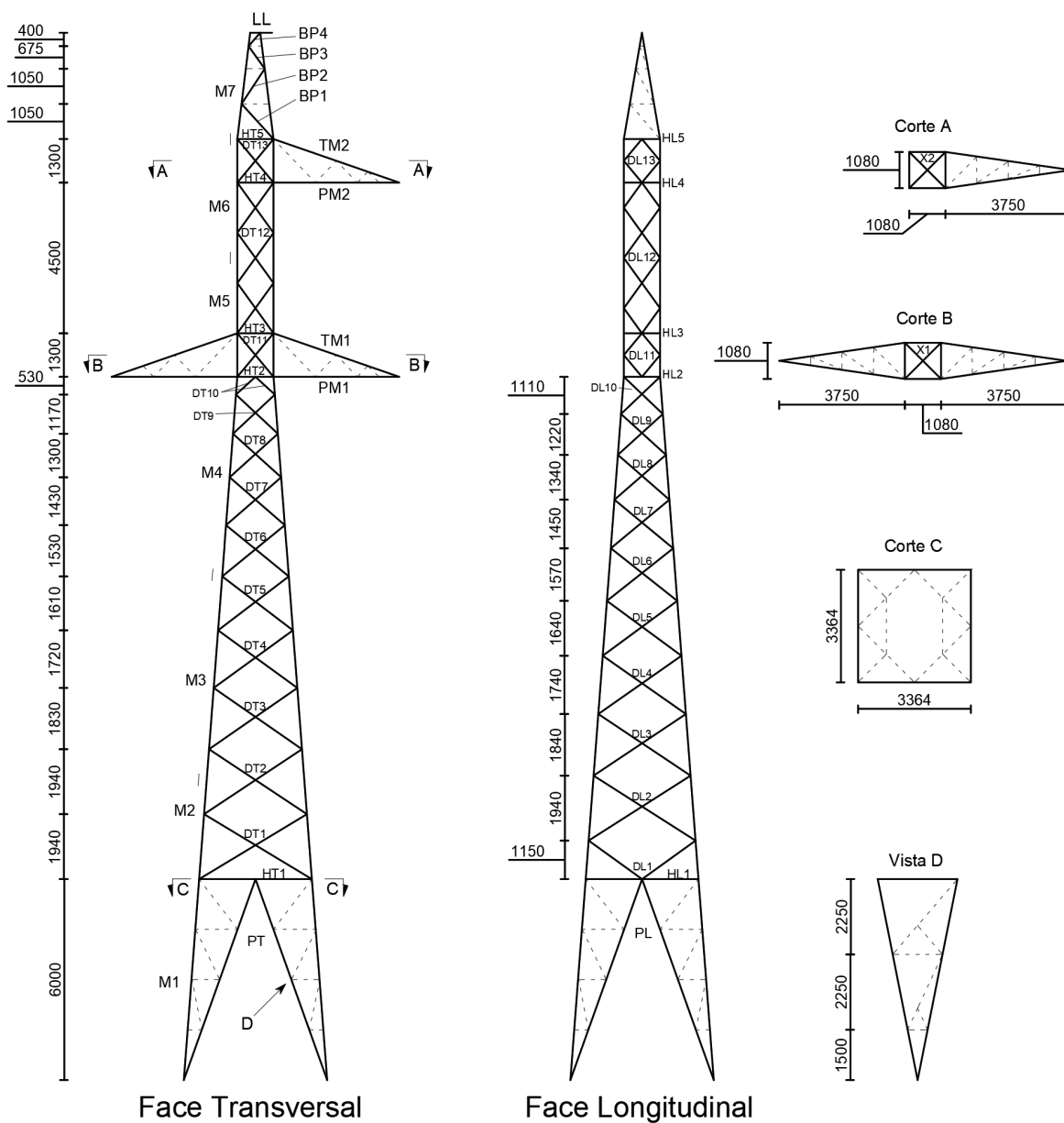


Tabela 7 – Área dos grupos de barras

GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)
M1	10,6	PL	2,96	PT	2,96	DL11	2,35	HT1	2,66
M2	8,75	DL1	2,96	DT1	2,96	DL12	2,66	HT2	2,35
M3	8,75	DL2	2,96	DT2	2,96	DL13	2,35	HT3	2,35
M4	7,36	DL3	2,66	DT3	2,66	DT11	2,96	HT4	2,66
M5	5,82	DL4	2,66	DT4	2,35	DT12	2,66	HT5	2,35
M6	4,71	DL5	2,35	DT5	2,35	DT13	2,66	PM1	3,89
M7	2,96	DL6	2,35	DT6	2,35	HL1	2,66	TM1	7,36
BP1	2,35	DL7	2,35	DT7	2,35	HL2	2,35	PM2	4,71
BP2	2,35	DL8	2,35	DT8	2,35	HL3	2,35	TM2	4,71
BP3	2,35	DL9	2,35	DT9	2,35	HL4	2,35	X1	2,35
BP4	2,35	DL10	2,35	DT10	2,35	HL5	2,35	X2	2,35

5.2 Penalização

Com os resultados dos doze heurísticos escolheu-se o BSA para otimizar a torre sem penalizar os ângulos com a finalidade de estabelecer as vantagens e desvantagens. A razão de escolher o BSA é porque seu melhor resultado foi muito próximo ao do método 2 do DSA e ainda o BSA apresentou excelente média e desvio padrão quando aplicado à este problema.

Na Tabela 8 estão representados a média, o desvio padrão e o melhor resultado das 5 rodadas realizadas com o BSA sem penalizar os ângulos da torre. Na Figura 14 e na Tabela 9 estão representadas a torre e os perfis do melhor resultado.

Cada rodada levou em torno de 6 horas e meia, uma redução de 18,75% no tempo quando comparada à otimização com a penalização.

Tabela 8 – Resultados BSA (sem penalizar ângulos)

	BSA
NRI	5
Média	2068,5849
DP	40,5735
MR	2007,2947

Figura 14 – Representação da torre gerada pelo melhor resultado do BSA (sem penalizar ângulos)

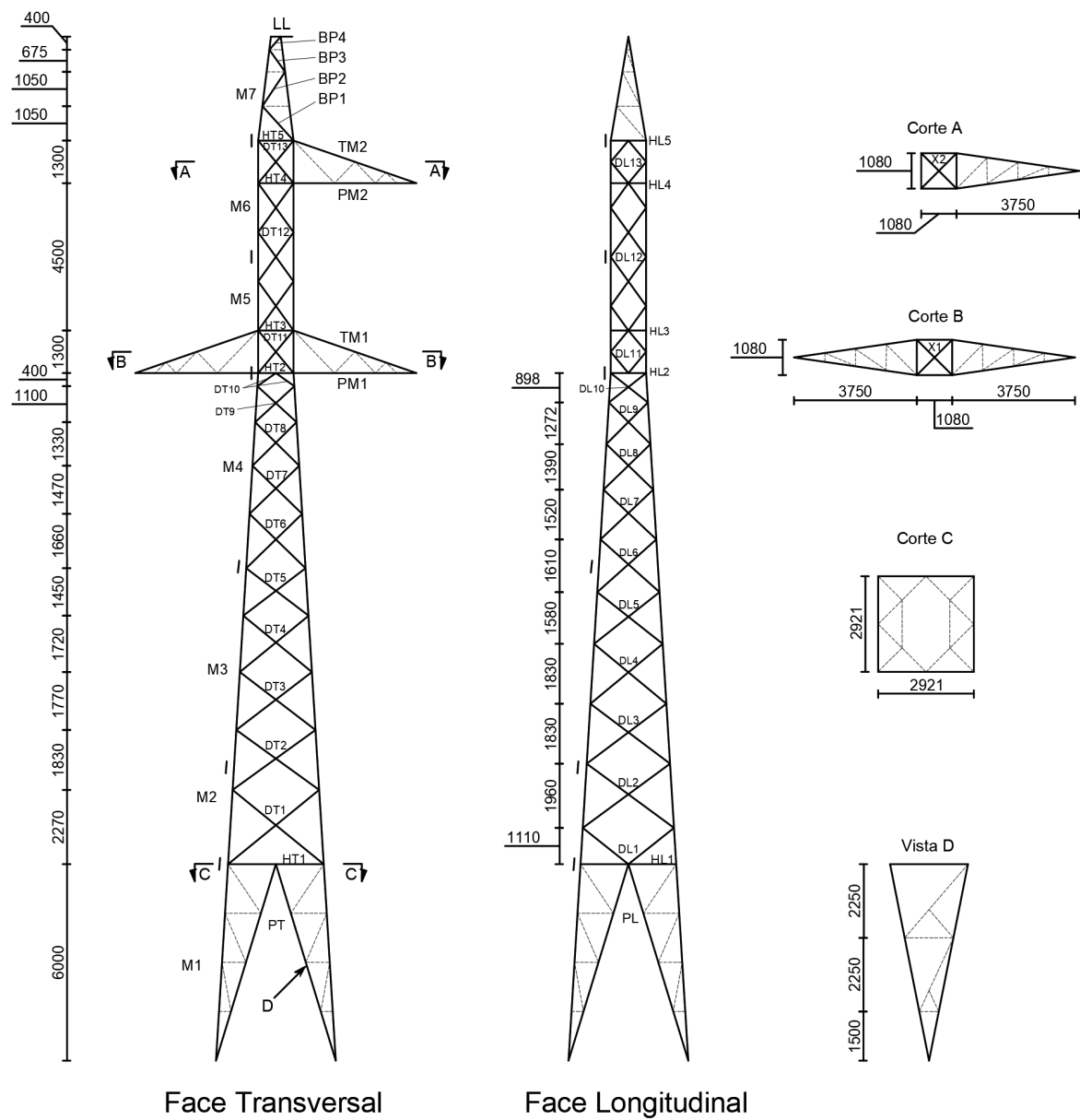


Tabela 9 – Área dos grupos de barras (sem penalizar ângulos)

GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)
M1	10,6	PL	3,89	PT	3,89	DL11	2,35	HT1	2,35
M2	10,6	DL1	2,96	DT1	2,96	DL12	2,66	HT2	2,35
M3	8,75	DL2	2,66	DT2	2,66	DL13	2,35	HT3	2,66
M4	7,36	DL3	2,66	DT3	2,66	DT11	2,96	HT4	2,66
M5	5,82	DL4	2,66	DT4	2,35	DT12	2,66	HT5	2,35
M6	4,71	DL5	2,35	DT5	2,35	DT13	2,66	PM1	3,89
M7	2,35	DL6	2,35	DT6	2,35	HL1	2,35	TM1	7,36
BP1	2,35	DL7	2,35	DT7	2,35	HL2	2,35	PM2	4,71
BP2	2,35	DL8	2,35	DT8	2,35	HL3	2,35	TM2	4,71
BP3	2,35	DL9	2,35	DT9	2,35	HL4	2,35	X1	2,35
BP4	2,35	DL10	2,35	DT10	2,35	HL5	2,35	X2	2,35

6 Discussões

Souza (2016) otimizou esta mesma torre em um trabalho de Dissertação de Mestrado, entretanto os *templates* considerados foram diferentes. Em seu trabalho, várias possibilidades de terminação inferior e superior para o tronco defasado foram admitidas, além de não considerar terminação inferior em “X” para o contínuo e, ainda para o contínuo, foram consideradas terminação superior em “X” e em “V” sem secundárias. Também não foi admitida a variação do padrão de secundárias para o contínuo no trabalho de Souza (2016), pois estas eram definidas juntamente com o número de camadas do tronco, enquanto neste trabalho primeiro definia-se a quantidade de camadas e depois as secundárias para cada camada.

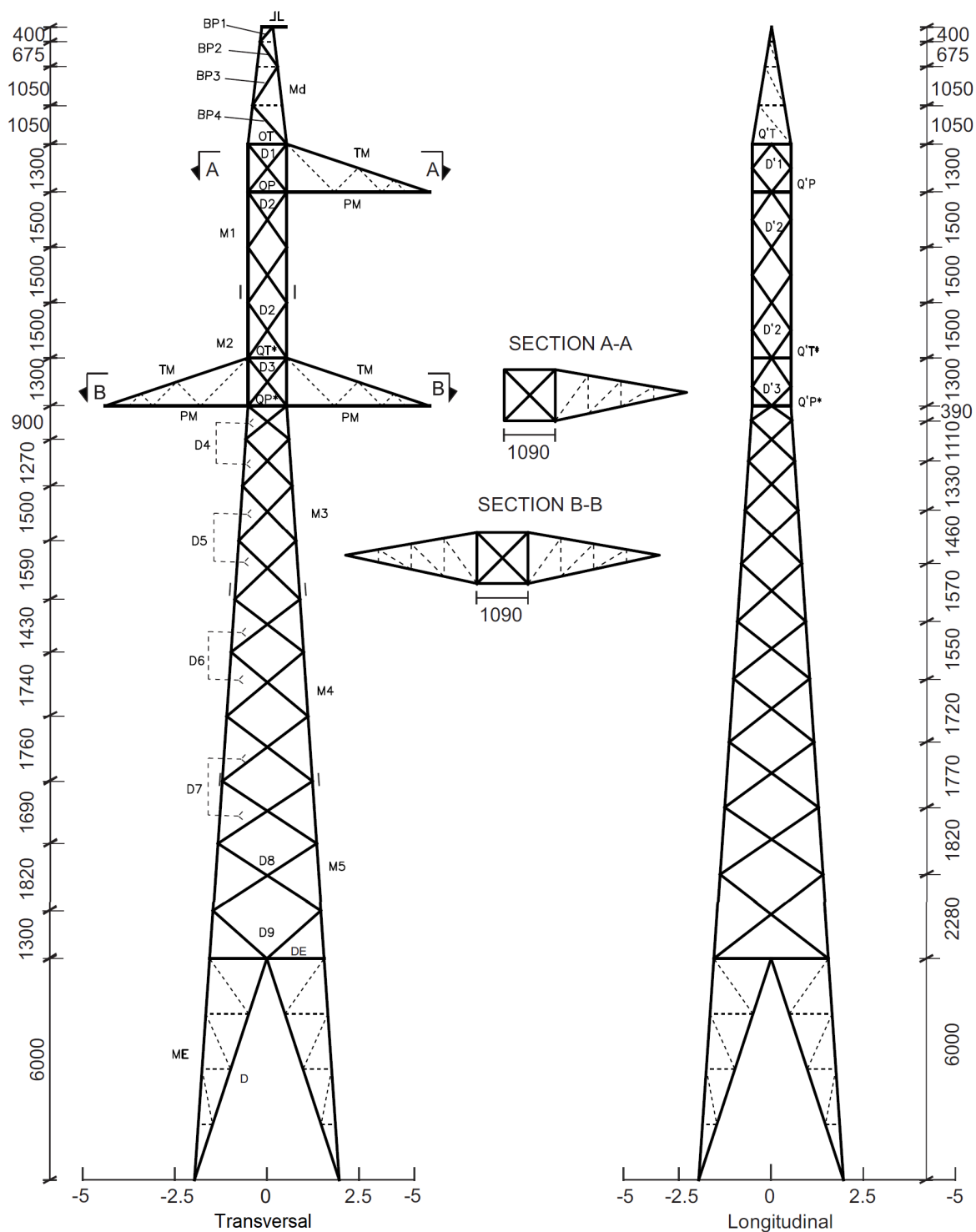
Outra diferença é o número de variáveis dimensionais, que neste trabalho foi um pouco maior por separar as mísulas em mais grupos e por considerar mais diagonais. E por fim, uma diferença relevante foi a diferença na análise estrutural. Souza (2016) considerou os montantes e diafragmas como elementos de pórtico e o restante como elementos de treliça.

Em contrapartida, os perfis utilizados na otimização foram os mesmos, as variáveis geométricas e as medidas iniciais para as terminações consideradas também. O cálculo do vento foi igualmente realizado de acordo com a IEC 60826 (2003), considerando também os mesmos quatro casos de carregamento.

Como neste trabalho, o resultado ótimo de Souza (2016) foi uma torre com tronco inclinado defasado de 8 camadas. Mas devido às diferenças mencionadas anteriormente, os resultados aqui foram um pouco melhores, até mesmo utilizando o BSA, heurístico utilizado por Souza (2016).

A torre de Souza (2016) é apresentada na Figura 15 e o resultado das áreas está descrito na Tabela 10. O peso dessa estrutura é de 2041,7 kg.

Figura 15 – Representação do melhor resultado de Souza (2016)



FONTE: Adaptado de Souza (2016)

Tabela 10 – Área dos grupos de barras de Souza (2016)

GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)	GRUPO	Área (cm^2)
ME	10.6	D7	2.66	BP4	2.35	Q'T	2.35
M5	10.6	D6	2.35	BP3	2.35	Q'P	2.35
M4	8.75	D5	2.35	BP2	2.35	Q'T*	2.35
M3	7.36	D4	2.35	BP1	2.35	Q'P'	2.35
M2	7.36	D3	2.96	PM	3.89	DE	17.5
M1	4.71	D2	2.66	TM	7.36	DM1	2.35
Md	2.66	D1	2.66	QT	2.35	DM2	2.35
DP	2.96	D'3	2.35	QP	2.35		
D9	2.96	D'2	2.66	QT*	2.35		
D8	2.66	D'1	2.35	QP*	2.35		

FONTE: Adaptado de Souza (2016)

7 Conclusão

Este trabalho apresentou uma otimização simultânea de áreas, geometria e topologia da estrutura de uma torre de linha de transmissão. Doze algoritmos heurísticos foram testados com o problema proposto, que envolvia 86 variáveis, sendo 55 de dimensão, 20 de geometria e 11 de topologia. Impôs-se restrições da ABNT NBR 8850 (2003) para esbeltez, razão entre largura e espessura e tensões de tração e compressão, além de deslocamento máximo dos nós de 0,40 m. Considerou-se quatro casos de carregamento e o vento foi calculado de acordo com a IEC 60826 (2003). Souza (2016) otimizou a mesma torre, mas com algumas diferenças nas variáveis consideradas.

Os resultados apresentados aqui foram significativamente melhores que o de Souza (2016). Uma das diferenças que contribuiu para que isso ocorresse está na análise estrutural, que neste trabalho foram considerados apenas elementos de pórtico e Souza (2016) considerou os montantes e diafragmas como elementos de pórtico e o restante como treliça. Outra diferença foi na separação dos montantes, que o grupo mais debaixo do tronco inclinado possui maior comprimento e maior seção transversal. A consideração de mais variáveis dimensionais permitiu que o peso total das mísulas deste trabalho fossem um pouco menores, no entanto tal solução adotada aqui não é adequada, uma vez que um dos casos de carregamento representa a ruptura de uma fase, que pode ocorrer em qualquer uma das mísulas. O *template* do resultado final de Souza (2016) também possibilitou a diferença na massa da torre, pelos esforços se distribuírem de maneira diferente.

O fato de mais topologias serem consideradas para o defasado por Souza (2016) pode fazer com que o heurístico acabe ficando mais distante de um mínimo global, já que a otimização deste trabalho e de Souza (2016) resultaram em torres com tronco defasado com 8 camadas internas, mas com uma diferença na massa significativa. Este acontecimento fica mais claro quando comparados os resultados de Souza (2016) com aqueles obtidos neste trabalho considerando a otimização da torre sem penalizar ângulos. E fica ainda mais evidente quando se considera a penalização dos ângulos, que diminui o espaço de busca porque acaba colocando um peso maior para torres com estéticas inadequadas, ou seja, menos resultados adequados ao problema existem. Pode-se ver nas Tabelas 4 e 8, onde a média foi de 2,30% menor, o desvio padrão foi reduzido em 81,8% e o melhor resultado quase não houve diferença, com um aumento na massa da torre de apenas 0,27% considerando a penalização de ângulos.

Portanto, a penalização de ângulos, por diminuir o número de resultados apropriados ao problema, acabou fazendo com que os heurísticos que geraram torres com menores massas, neste caso, obtivessem baixa média e desvio padrão, direcionando o processo de otimização frequentemente a resultados adequados, tanto relacionados à estética quanto à massa da torre. Além disso, percebe-se que a penalização dos ângulos possibilitou menor comprimento de flambagem nos montantes debaixo do tronco inclinado, tendo, assim, menores seções transversais, mas ao mesmo tempo, esta restrição dos ângulos não permitiu que a torre fechasse tanto embaixo quanto sem penalizar, o que acabou fazendo com que melhor resultado do BSA sem penalizar

ângulos fosse também o melhor apresentado neste trabalho.

Uma grande desvantagem do algoritmo de penalização dos ângulos é o tempo gasto por rodada, que acabou aumentando consideravelmente, mesmo com a aceleração da convergência explicada na Seção 4.2.2.4. No entanto, como explicado anteriormente, isso é compensado por conta dos resultados apresentarem menores desvio padrão e média.

Sobre a estética dos resultados, nota-se que as terminações de Souza (2016) e do resultado apresentado aqui sem penalizar ângulos estão mais achatadas e algumas camadas não apresentam uniformidade estética, em que os ângulos aumentam e diminuem aleatoriamente.

Em relação aos heurísticos:

- O PSO apresentou resultados inadequados à este problema por conta da população tender a ficar toda igual;
- O SGA, com os certos parâmetros, pode apresentar resultados apropriados à este problema, mas não quando comparado à algoritmos como o BSA e o DSA;
- Como o SGA, o GWO e o WOA-CBO perturbam menos a população a cada iteração e no fim não conseguem atingir excelentes resultados;
- O EVPS e o ECBO que possuem equações que descrevem algum fenômeno físico para perturbar a população, apresentam convergência rápida em relação aos outros heurísticos, mas alto desvio padrão. O ECBO se sobressaiu quando comparado ao EVPS;
- Como o PSO, no LBSA um indivíduo da população acaba influenciando os outros, o que acabou piorando seu resultado em relação ao BSA;
- A adaptação do ECBO, o CECBO, não obteve resultados apropriados para este problema, prejudicando, ao torná-lo caótico, a convergência do ECBO, a qual se sobressaiu no problema proposto neste trabalho;
- O ACS apresentou resultados adequados, mas o BSA e o DSA, também desenvolvidos pelo mesmo criador, sobressaíram-se neste problema;
- O CMaMa possui média e desvio padrão altos em relação aos melhores heurísticos apresentados aqui, mas um resultado adequado foi obtido em apenas 5 rodadas. Apesar de um indivíduo da população influenciar o outro como no PSO, o CMaMa tem sua performance melhorada pois gera indivíduos na direção oposta às piores soluções. No entanto, por reduzir o espaço de busca como no SGA, GWO e WOA-CBO, pode-se concluir que isso acaba prejudicando um pouco seus resultados, o que explica, novamente, média e desvio padrão elevados;
- Para este problema, o BSA e o DSA apresentaram excelentes resultados em relação aos outros heurísticos. Ambos apresentam as características adequadas para que isto ocorresse, como geração de população aleatória sem restringi-la cada vez mais ao longo das iterações e também não haviam indivíduos que se aproximavam uns dos outros.

8 Trabalhos Futuros

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar diferentes tipos de análise estrutural, considerando não linearidade física e geométrica;
- Determinar tipo e quantidade de parafusos;
- Empregar diferentes tipos de perfis na otimização;
- Otimizar outros tipos de torres;
- Tornar a penalização mais precisa, baseando-se em resultados ótimos de diferentes torres que realizaram otimização geométrica, para influenciar positivamente no espaço de busca e diminuir o custo computacional; e
- Realizar mais testes com estes e outros heurísticos em diferentes problemas para estabelecer com maior precisão o que torna um heurístico apropriado a um determinado problema.

9 Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Revisão das diretrizes para elaboração de orçamentos de linhas de transmissão – OLT**. Divisão de engenharia de transmissão – Eletrobrás S/A, 2005.
- AL-BERMANI, F.; KITIPORNCHAI, S. **Nonlinear finite element analysis of latticed transmission towers**. Engineering Structures, Elsevier, v. 15, n. 4, p. 259–269, 1993.
- ARORA, J. **Introduction to optimum design**. San Diego: Elsevier, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8850: Execução de Suportes Metálicos Treliçados para Linhas de Transmissão – Procedimento**. 2003.
- BOUSSAID, I.; LEPAGNOT, J.; SIARRY, P. **A survey on optimization metaheuristics**. Information Sciences, v. 237, p. 82-117, 2013.
- BROCKHOFF, D.; AUGER, A.; HANSEN, N. **On the effect of mirroring in the ipop active cma-es on the noiseless bbob testbed**. In: Proceedings of the 14th Annual Conference Companion on Genetic and Evolutionary Computation. New York, NY, USA: ACM, 2012.
- CHEN, D., ZOU, F., LU, R., WANG, P. **Learning backtracking search optimisation algorithm and its application**. Information Sciences, v. 376, p. 71-94, 2017.
- CIVICIOGLU, P. **Artificial cooperative search algorithm for numerical optimization problems**. Information Sciences, v. 229, p. 58-76, 2013.
- CIVICIOGLU, P. **Backtracking search optimization algorithm for numerical optimization problems**. Applied Mathematics and Computation, Elsevier, v. 219, n. 15, p. 8121–8144, 2013.
- CIVICIOGLU, P. **Transforming geocentric cartesian coordinates to geodetic coordinates by using differential search algorithm**. Computers & Geosciences, v. 46, p. 229-247, 2012.
- ELIAS, K.M.; FAKURY, R.H.; GRILO, L.F. **Torre de transmissão de energia elétrica: um novo olhar e possibilidades para o cenário de transmissão brasileiro**. Contribuição tecnocientífica ao Construmetal 2016 – 20 a 22 de setembro de 2016, São Paulo, SP, Brasil.
- FANG, S.; ROY, S.; KRAMER, J. **Transmission Structures**. Handbook of Structural Engineering, Ed: W.F. Chen, CRC Press, Boca Raton, 1997.
- FU, J.-Y.; WU, B.-G.; WU, J.-R.; DENG, T.; PI, Y.-L.; XIE, Z.-N. **Wind resistant size optimization of geometrically nonlinear lattice structures using a modified optimality criterion method**. Engineering Structures. v. 173, p. 573-588, 2018

- FU, X., LI, H.-N., YANG, Y.B., 2015. **Calculation of rain load based on single raindrop impinging experiment and applications.** J. Wind Eng. Ind. Aerod. 147, 85–94.
- FU, X.; LI, H.-N., **Uncertainty analysis of the strength capacity and failure path for a transmission tower under a wind load.** Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v.173, p. 147-155, 2018.
- GONÇALVES, M.S. **Metodologia de seleção de algoritmos para problemas de otimização contínua e com formulação black-box.** 1–165 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- GONÇALVES, M. S.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. **Search group algorithm: A new metaheuristic method for the optimization of truss structures.** Computers and Structures, v. 153, p. 165–184, 2015.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60826:2003: Design criteria of overhead transmission lines.** 2003.
- KAMINSKI-JR., J.; RIERA, J.; MENEZES, R. de; MIGUEL, L. F. F. **Model uncertainty in the assessment of transmission line towers subjected to cable rupture.** Engineering Structures, v. 30, n. 10, p. 2935 – 2944, 2008.
- KAVEH, A., DADRAS, A., MONTAZERAN, A.H. **Chaotic enhanced colliding bodies algorithms for size optimization of trusses.** Acta Mech (2018) 229: 2883.
- KAVEH, A., GHAZAAN, M.I. **Computer codes for colliding bodies optimization and its enhanced version.** Int. J. Optim. Civil Eng., 2014; 4(3):321-339
- KAVEH, A.; GHOLIPOUR, Y.; RAHAMI, H. **Optimal design of transmission towers using genetic algorithm and neural networks.** International Journal of Space Structures, Multi Science Publishing, v. 23, n. 1, p. 1–19, 2008.
- KAVEH, A., MOGHADDAM, M.R. **A hybrid WOA-CBO algorithm for construction site layout planning problem.** Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering 25 1094-1104, 2018.
- KAVEH, A.; TALATAHARI, S. **A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables.** Journal of Constructional Steel Research, Elsevier. v. 65, p. 1558-1568, 2009.
- KAVEH, A., VAEZ, S.R.H., HOSSEINI, P. **MATLAB code for an Enhanced Vibrating Particles System Algorithm.** Int. J. Optim. Civil Eng.; 8(3):401-414, 2018.
- KENNEDY, J.; R. EBERHART. **Particle Swarm Optimization.** Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, Australia, p.1942–1945, 1995.
- LI, C. Q. **A stochastic model of severe thunderstorms for transmission line design.** Probabilistic Engineering Mechanics, v. 15, n. 4, p. 359–364, 2000.

MATHAKARI, S.; GARDONI, P.; AGARWAL, P.; RAICH, A.; HAUKAAS, T. **Reliability-based optimal design of electrical transmission towers using multi-objective genetic algorithms.** Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Wiley Online Library, v. 22, n. 4, p. 282–292, 2007.

MAU, S. T. Introdução à Análise Estrutural - Métodos dos Deslocamentos e das Forças. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2015.

MENEZES, R. C. R. de. **Estudos de confiabilidade de linhas de transmissão submetidas à ação do vento.** 1988.

MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F. **Multimodal size, shape, and topology optimisation of truss structures using the firefly algorithm.** Advances in Engineering Software, Elsevier, v. 56, p. 23–37, 2013.

MIRJALILI S., MIRJALILI S. M., LEWIS A. **Grey Wolf Optimizer.** Advances in Engineering Software, vol. 69, p. 46-61, 2014.

PARIS, J.; MARTINEZ, S.; NAVARRINA, F.; COLOMINAS, I.; CASTELEIRO, M. **Structural optimization of high voltage transmission line towers considering continuum and discrete design variables.** Computer Aided Optimum Design in Engineering XII, WIT Press, v. 125, p. 59, 2012.

PEDERSEN, P. **On the optimal layout of multi-purpose trusses.** Computers & Structures, v. 2, p. 695-712, 1972.

RAJAN, S.D. **Sizing, shape, and topology design optimization of trusses using genetic algorithm.** Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, 1995.

RAJEEV, S.; KRISHNAMOORTHY, C. **Discrete optimization of structures using genetic algorithms.** Journal of structural engineering, American Society of Civil Engineers, 1992.

RIPPEL, L.I. **Estudo em túnel de vento do arrasto aerodinâmico sobre torres treliçadas de linhas de transmissão.** 1-152 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SAKA, M. **Shape optimization of trusses.** Journal of the Structural Division, ASCE, v. 106, n. 5, p. 1155–1174, 1980.

SHEA, K.; SMITH, I. F. **Improving full-scale transmission tower design through topology and shape optimization.** Journal of structural engineering, American Society of Civil Engineers, v. 132, n. 5, p. 781–790, 2006.

SIVAKUMAR, P., RAJARAMAN, A., SAMUEL KNIGHT, G. M., RAMACHANDRAMURTHY, D.S. **Object-Oriented Optimization Approach Using Genetic Algorithms for Lattice Towers.** J. Comput. Civ. Eng, p. 162-171, 2004.

SORIANO, H. L. *Análise de estruturas: formulação matricial e implementação computacional*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda, 2005.

SOUZA, R. R. de. **A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line towers**. 1–133 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SOUZA, R. R. de. **Metodologia Para Otimização topológica, Dimensional e Geométrica de Estruturas de Torres de Linhas de Transmissão**. 61 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2014.

SOUZA, R. R. de; MIGUEL, L. F. F.; LOPEZ, R. H.; MIGUEL, L. F. F.; TORII, A. J. **A procedure for the size, shape and topology optimization of transmission line tower structures**. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 111, p. 162–184, 2016.

SVED, G.; GINOS, Z. **Structural optimization under multiple loading**. *International Journal of Mechanical Sciences*, Elsevier, v. 10, n. 10, p. 803–805, 1968.

TORII, A. J.; LOPEZ, R. H.; BIONDINI, F. **An approach to reliability-based shape and topology optimization of truss structures**. *Engineering Optimization*, Taylor & Francis, v. 44, n. 1, p. 37–53, 2012.

TORT, C.; SAHIN, S.; HASANÇEBI, O. **Optimum design of steel lattice transmission line towers using simulated annealing and PLS-TOWER**. *Computers & Structures*, Elsevier, v. 179, p. 75–94, 2017.

WANG, H.; OHMORI, H. **Elasto-plastic analysis based truss optimization using Genetic Algorithm**. *Engineering Structures*, Elsevier, v. 50, p. 1–12, 2013.

WU, S.-J.; CHOW, P.-T. **Integrated discrete and configuration optimization of trusses using genetic algorithms**. *Computers & structures*, Elsevier, v. 55, n. 4, p. 695–702, 1995.